

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ENERGETICKÝ ÚSTAV

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF ENERGY

VĚTRÁNÍ KABINY OSOBNÍHO AUTOMOBILU - VÝZKUM CHARAKTERU PROUDĚNÍ Z ROZMRAZOVACÍ MŘÍŽKY PŘEDNÍHO SKLA A ÚČINNOST TOHOTO SYSTÉMU.

**VENTILATION IN A LIGHT DUTY VEHICLE – RESEARCH ON DEFROST OF WINDSHIELD AND
ITS EFFICIENCY**

DIPLOMOVÁ PRÁCE
MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

RADIM HAPALA

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

ING. FRANTIŠEK LÍZAL

VLOŽIT ORIGINÁLNÍ ZADÁNÍ

VLOŽIT ORIGINÁLNÍ ZADÁNÍ

LICENČNÍ SMLOUVA POSKYTOVANÁ K VÝKONU PRÁVA UŽÍT ŠKOLNÍ DÍLO

uzavřená mezi smluvními stranami:

1. Pan/paní

Jméno a příjmení: Radim Hapala

Bytem: Kulturní 1761, Rožnov pod Radhoštěm

Narozen/a (datum a místo): 3.9.1983 Valašské Meziříčí

(dále jen „autor“)

a

2. Vysoké učení technické v Brně

Fakulta strojního inženýrství

se sídlem Technická 2896/2, 616 69, Brno

jejímž jménem jedná na základě písemného pověření děkanem fakulty:

doc. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc.

(dále jen „nabyvatel“)

Čl. 1

Specifikace školního díla

1. Předmětem této smlouvy je vysokoškolská kvalifikační práce (VŠKP):

- ☐ disertační práce
- ☐ diplomová práce
- ☐ bakalářská práce
- ☐ jiná práce, jejíž druh je specifikován jako

(dále jen VŠKP nebo dílo)

Název VŠKP:	Větrání kabiny osobního automobilu – výzkum charakteru proudění z rozmrazovací mřížky předního skla a účinnost tohoto systému
Vedoucí/ školitel VŠKP:	Ing. František Lízal
Ústav:	Energetický ústav
Datum obhajoby VŠKP:	22.6.2009

VŠKP odevzdal autor nabyvateli v * :

- | | | | |
|---|---|-----------------|---|
| <input type="checkbox"/> tištěné formě | – | počet exemplářů | 2 |
| <input type="checkbox"/> elektronické formě | – | počet exemplářů | 2 |

* hodící se zaškrtněte

2. Autor prohlašuje, že vytvořil samostatnou vlastní tvůrčí činností dílo shora popsané a specifikované. Autor dále prohlašuje, že při zpracovávání díla se sám nedostal do rozporu s autorským zákonem a předpisy souvisejícími a že je dílo dílem původním.
3. Dílo je chráněno jako dílo dle autorského zákona v platném znění.
4. Autor potvrzuje, že listinná a elektronická verze díla je identická.

Článek 2

Udělení licenčního oprávnění

1. Autor touto smlouvou poskytuje nabyvateli oprávnění (licenci) k výkonu práva uvedené dílo nevýdělečně užít, archivovat a zpřístupnit ke studijním, výukovým a výzkumným účelům včetně pořizování výpisů, opisů a rozmnoženin.
2. Licence je poskytována celosvětově, pro celou dobu trvání autorských a majetkových práv k dílu.
3. Autor souhlasí se zveřejněním díla v databázi přístupné v mezinárodní síti
 - ☐ ihned po uzavření této smlouvy
 - ☐ 1 rok po uzavření této smlouvy
 - ☐ 3 roky po uzavření této smlouvy
 - ☐ 5 let po uzavření této smlouvy
 - ☐ 10 let po uzavření této smlouvy(z důvodu utajení v něm obsažených informací)
4. Nevýdělečné zveřejňování díla nabyvatelem v souladu s ustanovením § 47b zákona č. 111/1998 Sb., v platném znění, nevyžaduje licenci a nabyvatel je k němu povinen a oprávněn ze zákona.

Článek 3

Závěrečná ustanovení

1. Smlouva je sepsána ve třech vyhotoveních s platností originálu, přičemž po jednom vyhotovení obdrží autor a nabyvatel, další vyhotovení je vloženo do VŠKP.
2. Vztahy mezi smluvními stranami vzniklé a neupravené touto smlouvou se řídí autorským zákonem, občanským zákoníkem, vysokoškolským zákonem, zákonem o archivnictví, v platném znění a popř. dalšími právními předpisy.
3. Licenční smlouva byla uzavřena na základě svobodné a pravé vůle smluvních stran, s plným porozuměním jejímu textu i důsledkům, nikoliv v tísní a za nápadně nevýhodných podmínek.
4. Licenční smlouva nabývá platnosti a účinnosti dnem jejího podpisu oběma smluvními stranami.

V Brně dne:

.....
Nabyvatel

.....
Autor

Abstrakt

Diplomová práce se zabývá výzkumem proudění nad rozmrazovací mřížkou čelního skla osobního automobilu Škoda Octavia. V požadovaném rozsahu byly žárovou anemometrií změřeny složky rychlosti a intenzity turbulence. Získaná data byla následně prezentována v grafické podobě a výsledky byly porovnány s předchozí prací.

Abstract

The diploma thesis deals with research of the jet issuing from the defrost duct of Skoda Octavia car. Components of velocity and turbulence intensity were measured using hot wire anemometry. Obtained data were presented in graphs and contour maps. Results were confronted with previous research.

Klíčová slova

žárová anemometrie, drátková sonda, tříosá vlákno - filmová sonda, větrání, větrání automobilu, rychlostní pole

Key words

CTA, wire probe, tri-axial fibre – film probe, ventilation, car ventilation, velocity field

Bibliografická citace

HAPALA, R. *Větrání kabiny osobního automobilu – výzkum charakteru proudění z rozmrazovací mřížky předního skla a účinnost tohoto systému*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2009. 70 s. Vedoucí diplomové práce Ing. František Lízal.

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených na seznamu, který tvoří přílohu této práce.

.....
V Brně 28. května 2009

Radim Hapala

Poděkování

Děkuji tímto panu Ing. Františku Lízalovi a panu Ing. Janu Jedelskému, Ph.D. za odborné konzultace, cenné připomínky, rady a vstřícný přístup, jež byly velkým přínosem při řešení mé diplomové práce.

Obsah

1 Úvod.....	13
2 Systém odmrazování čelního skla.....	14
3 Charakter proudění a jeho vliv na přenos tepla a látky.....	14
4 Žárová anemometrie.....	17
4.1 Fyzikální základ.....	17
4.2 Principy CTA systému.....	18
4.3 Komponenty měřící trasy CTA systému.....	18
4.3.1 Sondy.....	19
4.3.2 Držáky sond.....	20
4.3.3 CTA anemometr.....	21
4.3.4 A/D převodníky.....	21
4.3.5 PC s ovládacím softwarem.....	21
4.3.6 Posuvné systémy	21
4.3.7 Kalibrační sestava.....	22
4.4 Softwarové nastavení.....	22
4.4.1 Systémová konfigurace.....	22
4.4.2 Hardwarové nastavení.....	22
4.5 Kalibrace.....	23
4.5.1 Rychlostní kalibrace.....	23
4.5.2 Směrová kalibrace.....	25
4.6 Stanovení celkové rychlosti a celkové intenzity turbulence.....	27
5 Popis měřeného objektu.....	29
5.1 Palubní deska.....	29
5.2 Geometrie mřížky	32
6 Měření roviny a profily.....	32
7 Metodiky měření.....	35
7.1 Měření SY sondou.....	35
7.2 Měření 3D sondou.....	37
7.3 Měření parametrů okolního prostředí.....	39
8 Výsledky.....	40
8.1 Porovnání měření SY a 3D sondou.....	40
8.2 Grafické znázornění výsledků získaných 3D sondou.....	41
8.3 Grafy rychlostí a intenzity turbulence	50
8.4 Datové soubory.....	52
8.5 Nejistoty měření.....	53
8.5.1 Vztahy pro výpočet nejistot.....	53
8.5.2 Výpočet celkové relativní nejistoty měření rychlosti 3D sondou...	56
8.5.3 Rozbor nejistot měření.....	59
9 Vyhodnocení výsledků.....	60
10 Zhodnocení použitých postupů měření.....	61
11 Porovnání výsledků s předchozí prací.....	62
11.1 Grafické porovnání výsledků.....	62
11.2 Vyhodnocení porovnání výsledků.....	65
12 CFD.....	65
13 Závěr.....	67
14 Literatura.....	68
15 Seznam symbolů.....	69

1 Úvod

Diplomová práce se zabývá výzkumem proudění nad vyústkami pod čelním sklem osobního automobilu. Měření bylo provedeno na přístrojové desce Škody Octavia II, která je na odboru Techniky prostředí k dispozici. K měření byl zvolen systém CTA (constant temperature anemometry) – žárová anemometrie založená na udržování konstantní teploty žhaveného elementu. Tento systém je při použití vhodné sondy vyhovující pro měření trojrozměrného proudění vzduchu, vyhodnocuje jak rychlost, tak i turbulenci. K výzkumu bylo použito CTA zařízení StreamLine s vlastním softwarem StreamWare od firmy Dantec. V první fázi bylo nutné, naučit se rutinně s celým měřicím systémem pracovat, orientovat se v softwaru a získat zručnost v manipulaci se sondami, které jsou velmi křehké, a snadno dojde k jejich poškození.

Práce navazuje na diplomovou práci [11], jejímž autorem je Ing. František Lízal, který vycházel z předpokladu, že ze štěrbinové vyústky jako celku vychází plochý proud s jednou dominantní a dvěma řádově nižšími složkami rychlosti. Následně bylo jako měřicí zařízení zvoleno CTA s dvou drátkovou sondou, která je primárně určená k měření dvou složek rychlosti. Zvolená metodika vždy jednu složku zanedbala, což způsobilo relativně vysoké navýšení celkové nejistoty měření. Byla také provedena vizualizace kouřovou metodou, která zřetelně potvrdila proud se 3 složkami rychlosti. V závěru práce bylo pro následující etapy měření navrženo použití 3D (tříosé) sondy, což odstraní podstatnou složku celkové nejistoty měření.

Cílem této práce tedy bylo proměřit 3D sondou jeden vhodný výdech, získaná data prezentovat v grafické podobě a následně je porovnat s předešlou prací. K dispozici byly navíc také SY (single yawed) sondy, kterými je taktéž možno měřit trojrozměrné proudění. V menším rozsahu bylo provedeno měření, jehož smyslem bylo vyhodnotit vhodnost SY sond pro případné využití v následujících etapách výzkumu proudění v kabině osobního automobilu. Získaná data byla porovnána s daty naměřenými 3D sondou.

2 Systém odmrazování čelního skla

Systém odmrazování čelního skla je součástí větracího a vytápěcího systému automobilu, který má za úkol zabezpečovat vhodné podmínky mikroklimatu pro pobyt osob. Zajišťuje jak tepelnou pohodu, tak vhodné podmínky z hlediska čistoty vzduchu. Nevhodné podmínky stavu mikroklimatu mohou způsobovat únavu osob uvnitř, což je převážně z hlediska řidiče nepřijatelné. Úkolem systému rozmrazování čelního skla je zajištění dobré viditelnosti z vozu. K zamlžení (kondenzaci vzdušné vlhkosti) skla dochází v situaci, kdy teplota skla klesne pod teplotu rosného bodu při daném atmosférickém tlaku a měrné vlhkosti vzduchu. Systém by měl vhodnými parametry zajišťovat, jednak co možná nejrychlejší odstranění zkondenzované vlhkosti v situaci, kdy auto delší dobu stálo (např. ráno) a následně při jízdě zamezit její opětovné kondenzaci. Z hlediska tepelné pohody není vhodné přivádět dlouhodobě teplý vzduch (vyvolá únavu). Z těchto důvodů je nutné, aby byl systém optimálně vyvážený a na samotném procesu se v co největší míře podílely i zbylé faktory, které mají na přenos tepla a vlhkosti vliv [11].

3 Charakter proudění a jeho vliv na přenos tepla a látky

V procesu rozmrazování čelního skla se především uplatňuje konvektivní přenos tepla a látky. Konkrétně se jedná o nucenou konvekci kolem rovinného povrchu. Dodávaný tepelný tok je dán rovnicí 3-1, hmotnostní tok odváděné látky lze vyjádřit rovnicí 3-2 [9].

$$Q = \alpha \cdot S \cdot (T_w - T_\infty) \quad (3-1)$$

kde: α je součinitel přestupu tepla ($\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$)
 S je teplosměnná plocha (m^2)
 T_w je teplota skla (K)
 T_∞ je teplota přiváděného vzduchu (K)

$$m_A = \beta \cdot S \cdot (\rho_{A,w} - \rho_{A,\infty}) \quad (3-2)$$

kde: β je součinitel přestupu látky ($\text{kg} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$)
 S je teplosměnná plocha (m^2)
 $\rho_{A,w}$ je měrná hmotnost páry zkondenzované na skle při daných podmínkách ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)
 $\rho_{A,\infty}$ je měrná hmotnost páry v přiváděném vzduchu ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)

Pro řešení přestupu tepla nebo látky je nutné znát součinitele α , β . Jejich výpočet se provádí užitím bezrozměrných podobnostních čísel.

$$\alpha = \frac{\text{Nu} \cdot \lambda}{L} \quad (3-3)$$

kde: Nu je Nusseltovo číslo (-), $\text{Nu} = f(\text{Re}, \text{Pr})$
 λ je tepelná vodivost vzduchu ($\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)
 L je charakteristický rozměr (m)

$$\beta = \frac{Sh \cdot D_{AB}}{L} \quad (3-4)$$

kde: Sh je Sherwoodovo číslo (-), $Sh = f(Re, Sc)$
D je koeficient difuze látky A do látky B ($m^2 \cdot s^{-1}$)
L je charakteristický rozměr (m)

Střední Nusseltovo číslo je pro nucenou konvekci při obtékání rovinné desky turbulentním prouděním dáno rovnicí 3-5.

$$Nu_L = 0,037 \cdot Re_L^{\frac{4}{5}} \cdot Pr^{\frac{1}{3}} \quad (3-5)$$

kde: Re je Reynoldsovo číslo (-)
Pr je Prandtlovo číslo (-)

Platí za podmínek: $Re_L < 8 \cdot 10^8$, $0,6 < Pr < 50$

$$Re = \frac{u \cdot L}{\nu}$$

kde: u je rychlost proudění ($m \cdot s^{-1}$)
ν je kinematická viskozita ($m^2 \cdot s^{-1}$)

$$Pr = \frac{\eta \cdot c_p}{\lambda} \quad (3-6)$$

kde: η je dynamická viskozita ($N/s/m^2$)
c_p je měrná tepelná kapacita za konstantního tlaku ($J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$)
λ je tepelná vodivost vzduchu ($W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$)

Střední Sherwoodovo číslo má při stejných podmínkách totožné koeficienty jako číslo Nusseltovo a lze jej vyjádřit rovnicí 3-7.

$$Sh_L = 0,037 \cdot Re_L^{\frac{4}{5}} \cdot Sc^{\frac{1}{3}} \quad (3-7)$$

kde: Sc je Schmidtovo číslo (-)

$$Sc = \frac{\nu}{D_{AB}} \quad (3-8)$$

Z uvedených rovnic je patrné, že důležitým faktorem ovlivňujícím jak přenos tepla, tak přenos látky je Reynoldsovo číslo, což je poměr setrvačných a vazkých sil. Z teorie víme, že hodnota Re je určující pro charakter proudění, je-li malé, je proudění laminární, dosáhne-li kritické hodnoty $Re_{krit} \approx 5 \cdot 10^5$, pak dochází k přechodu do turbulentního režimu. Turbulentní proudění se vyznačuje proměnnou velikostí rychlosti v čase. Okamžitou rychlost lze pak zapsat ve tvaru:

$$u_i = \overline{u_i} + u_i' \quad (3-9)$$

kde: $\overline{u_i}$ je střední hodnota rychlosti v čase ($m \cdot s^{-1}$)
 u_i' je fluktuační složka rychlosti ($m \cdot s^{-1}$)

Intenzita turbulence se stanoví z rovnice 3-10.

$$Tu = \frac{u_i'}{\overline{u_i}} \cdot 100 (\%) \quad (3-10)$$

Při řešení úkolu optimalizace rozmrazování čelního skla je zřejmé, že největší význam na účinnost tohoto systému mají tři hlavní faktory, je to teplota přiváděného vzduchu, jeho rychlost a v neposlední řadě intenzita turbulence. Teplotní hledisko ponecháme stranou, jeho možnosti jsou omezené teplotním komfortem osob. Pak nejsnadnějším způsobem, jak zvýšit účinnost rozmrazování skla, jsou konstrukční úpravy mřížky do podoby, která zajistí vhodné směřování proudu, ale hlavně vytvoří podmínky pro vývoj turbulentního proudění.

4 Žárová anemometrie

Použití žárové anemometrie má dlouhou tradici. Počátky se datují do první poloviny 20. století. Hlavní objev byl učiněn v padesátých letech, kdy byl představen CTA (constant temperature anemometry) systém určený pro komerční využití. Od té doby je tato přesná a snadno použitelná metoda hojně využívána pro měření turbulentního proudění jak v plynech, tak v kapalinách. Hlavní předností je relativně příznivá cena, především ve srovnání s hlavními konkurenty, což jsou LDA (laser doppler anemometry) systémy. Dále je to vysoká frekvenční odezva (až 40 kHz), která umožňuje snadno měřit fluktuace rychlosti, ze kterých pak lze spočítat intenzitu turbulence. Sondy různých tvarů umožňují měřit až trojrozměrné proudění, lze měřit jak poblíž stěn, tak uvnitř trubek a v hůře dostupných místech. Nevýhodou je, že při vysoce turbulentním proudění může docházet k vratnému proudění, což senzor neumí rozpoznat. Sonda je při měření umístěna v proudu, což může ovlivnit jeho charakter. Sondy jsou velmi křehké a je potřebná maximální obezřetnost při manipulaci s nimi, aby nedošlo k jejich poškození. K porušení může také dojít nárazem pevných částic vyskytujících se v proudu, proto je nutné do přívodu umístit filtr [2].

4.1 Fyzikální základ

Žárová anemometrie je založena na konvektivním přenosu tepla ze žhaveného elementu (drátek, vlákno, film, ...) do okolního prostředí [12].

Platí:

$$Q = S \alpha (t_w - t_\infty) \quad (4-1)$$

kde: S je plocha elementu (m^2)
 α je součinitel přestupu tepla konvekcí ($W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$)
 t_w je teplota povrchu elementu ($^{\circ}C$)
 t_∞ je teplota proudící látky ($^{\circ}C$)

Příkon pro elektrický ohřev tělíska je dán vztahem:

$$P = R I^2 \quad (4-2)$$

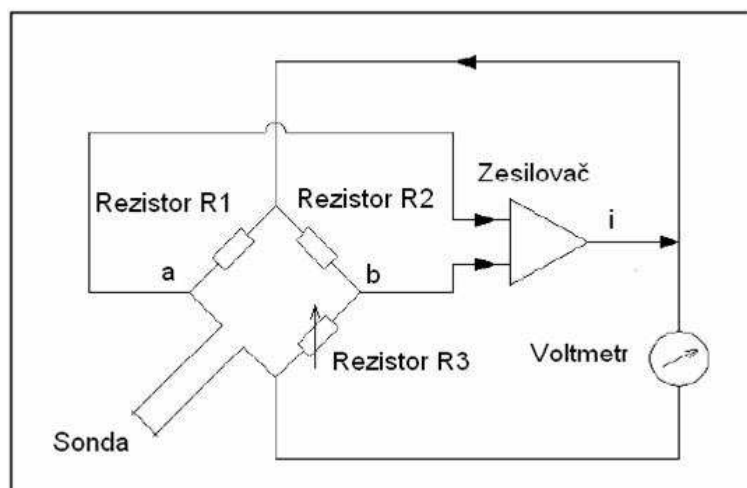
kde: R je elektrický odpor tělíska (Ω)
 I je proud procházející tělískem (A)

Tepelný tok konvekcí daný rovnicí (4-1) a elektrický příkon daný rovnicí (4-2) musí být v rovnováze. Je tedy možno volit dva přístupy měření rychlosti proudu látky kolem žhaveného elementu:

- žhavení konstantním proudem (CCA - constant current anemometry),
- žhavení na konstantní odpor potažmo teplotu (CTA – constant temperature anemometry).

4.1 Princip CTA systému

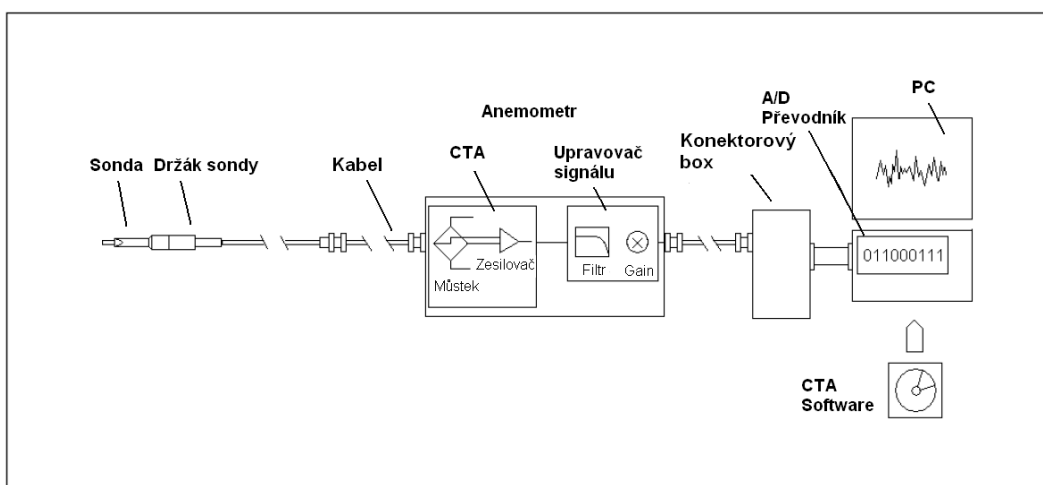
Na obrázku 4-1 je znázorněno schéma CTA okruhu, ten se skládá z Wheatstoneova můstku, operačního zesilovače a voltmetru. Proudí-li kolem senzoru určité medium, dochází k jeho ochlazení (snižuje se jeho odpor), tím pádem je mezi body a, b rozdíl napětí, což je okamžitě zaznamenáno operačním zesilovačem, který vrátí zpět na můstek proud o velikosti úměrné dané změně, což vede k vyrovnaní odporu (teploty) senzoru na počáteční stav [1], [11].



Obr. 4-1: Schéma CTA okruhu

4.3 Komponenty měřicí trasy CTA systému

Měřicí trasa CTA systému se skládá z několika dílčích prvků (viz obrázek 4.1) k jejich popisu v následujících kapitolách se vychází především z materiálů firmy Dantec Dynamics [4], [10]. Vyžaduje-li experiment pohyb sondy (měření profilů, rovin), pak je další potřebnou komponentou traverzovací systém. Poslední významnou součástí je kalibrační sestava. Všechny zmíněné prvky jsou podrobněji rozebrány v následujících podkapitolách.



Obr. 4-2: Schéma měřicí trasy

4.3.1 Sondy

Volba sond je závislá na:

- proudící látce
- počtu měřených komponent rychlosti (1, 2 až 3),
- předpokládaném rozsahu rychlosti,
- požadovaném prostorovém rozlišení,
- intenzitě turbulence a frekvenci fluktuací v proudu,
- rozpětí teplot,
- dostupném prostoru v okolí měřeného bodu (volný proud, měření u stěn, měření v trubkách, ...).



Obr. 4-3: Rozdělení sond podle druhu senzoru

Sondy jsou dostupné se čtyřmi typy senzorů: miniaturní drátek, zlatem potahovaný drátek, vlákno – filmový senzor, filmový senzor.

Miniaturní drátky jsou z wolframu potaženého platinou, mají obvykle průměr 5 μm a délku 1,25 mm. Senzor je s vidlicemi svařen.

Jsou určeny k měření proudění vzduchu s intenzitou turbulence do 5 – 10 %, mají nejvyšší frekvenční odezvu (až 400 kHz), rozsah měřených rychlostí je 0,05 – 500 m/s, jsou cenově nejdostupnější a bez problému opravitelné.

Zlatem potahovaný drátek je také z wolframu potaženého platinou a aktivní měřící rozměry jsou obvykle totožné s miniaturní sondou (průměr 5 μm a délku 1,25 mm), ale oba konce má potaženy mědí a zlatem, z důvodu minimalizování tepelného rušení vidlicemi, celková délka senzoru je pak 3 mm.

Jsou určeny k měření proudění vzduchu s intenzitou turbulence do 0 – 25 %, mají vysokou frekvenční odezvu (až 400 kHz), rozsah měřených rychlostí je 0,05 – 200 m/s, lze je také opravit.

Vláknový – filmový senzor jsou tvořeny křemíkovými vlákny potaženými niklovým filmem (tloušťka 0,1 μm), který je ještě chráněn tenkou nebo silnou křemíkovou vrstvou. Oba konce senzoru jsou potaženy zlatem a mědí ze stejného důvodu jako u předchozího typu. Průměr senzoru je obvykle 70 μm a aktivní délka je 1,25 mm (celková délka 3 mm). Senzor je k vidlicím pájen.

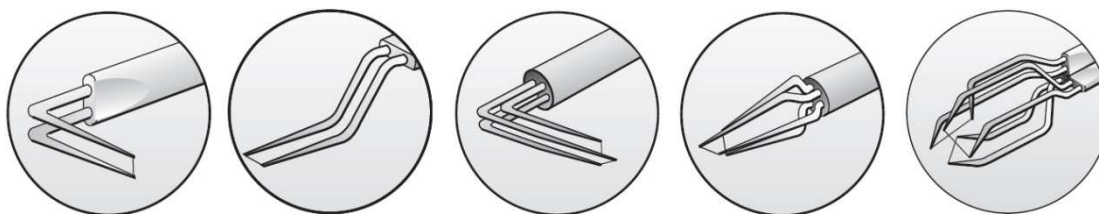
Senzory s tenkým křemíkovým potahem jsou určeny k měření ve vzduchu, mají nižší frekvenční odezvu (max. 175kHz), rozsah měřených rychlostí je 0,05 – 350 m/s, jsou opravitelné. Výhodou oproti předchozím typům je robustnost senzoru, proto mohou být použity v méně čistém prostředí.

Senzory se silným křemíkovým potahem jsou určeny pro měření ve vodě, mají frekvenční odezvu max. 30 kHz, rozsah měřených rychlostí je 0,01 – 10 m/s.

Oba dva typy jsou opravitelné.

Filmový senzor je tvořen tenkým niklovým filmem, který je vložen do špičky aerodynamického těla sondy. Senzory s tenkým křemíkovým potahem jsou určeny k měření ve vzduchu, se silným potahem k měření ve vodě. Je s nimi možné měřit v nejméně čistém prostředí. Tyto sondy jako jediné nejdou při poškození opravit.

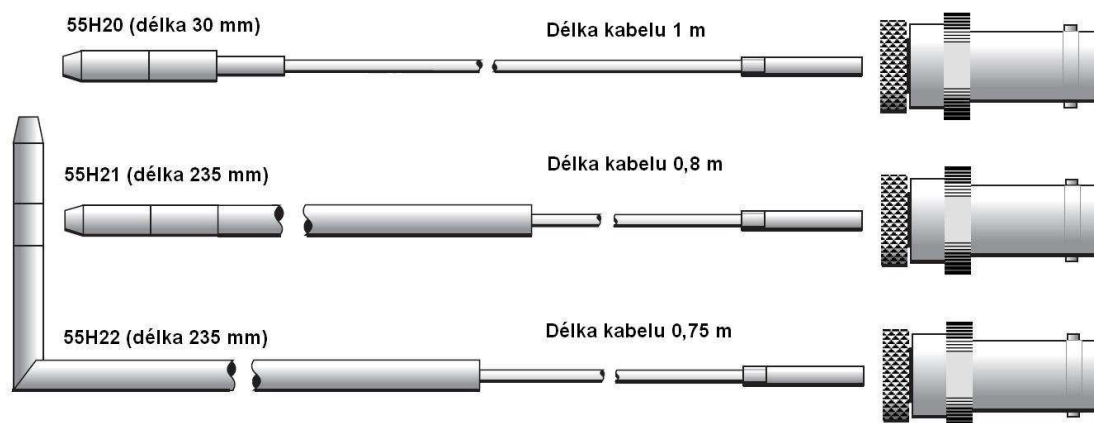
Sondy jsou dostupné v mnoha variantách, liší se nejen v materiálech použitých pro výrobu senzorů, ale i v tvarech vidlic, které umožňují vyhovět různým specifikům experimentu. Jsou k dispozici sondy až se třemi senzory, se kterými je možné najednou měřit tři složky rychlosti a fluktuací.



Obr. 4-4: Ilustrační výběr sond s rozdílným počtem a tvarem vidlic

4.3.6 Držáky sond

Hlavním kritériem rozdělení držáků je počet senzorů sondy. Existují tedy různé varianty určené pro jedno, dvou, tří senzorové sondy. Konkrétní držák je vždy použitelný, jak pro drátkové, tak vláknové sondy. Existuje několik typů lišících se délkou a tvarem. Filmové sondy mají vlastní specifické držáky.



Obr. 4-5: Držáky jedno drátkových sond

4.3.3 CTA anemometr

CTA anemometr StreamLine od firmy Dantec je výzkumný typ anemometru, s frekvenčním rozsahem až 400 kHz, do něhož lze namontovat až 6 měřících kanálů.

Anemometr má v sobě zabudován měřící modul a modul pro úpravu výstupního signálu. Měřící modul (obrázek 4-1) se skládá z operačního zesilovače, voltmetru a Wheatstoneova můstku, kde je na jednom rameni umístěna sonda, dále pak zde jsou dva neměnné odpory a odporová dekáda, která slouží k nastavení pracovní teploty senzoru. Modul pro úpravu signálu je složen z filtrů s horní a dolní propustí, které čistí signál od parazitních frekvencí, zesilovač rozlišení měřící karty (zesilovač s parametrem 16, zvýší rozlišení 12 bitové karty na úroveň 16 bitové).

4.3.4 A/D převodníky

A/D převodníky slouží k převodu analogového napětového signálu získaného anemometrem do digitální podoby, tak aby bylo možné data následně počítačově zpracovat. Volba převodníku je závislá na požadovaných nárocích:

- dostatečném počtu vstupních kanálů
- rozsahu vstupního napětí, měl by pokrýt rozsahy vysílané anemometrem, pro většinu aplikací je vhodný rozsah 0 – 10 V
- vstupním rozlišením, 12 bitový převodník poskytuje rozlišení rychlosti 0,1% - 0,2 %,
- vzorkovací frekvenci SR (sampling rate), měla by být minimálně dvakrát větší, než maximální frekvence v proudu, $SR = 2 f_{\max}$, snižuje se ovšem úměrně s počtem použitých kanálů n , $SR(n) = 1/n \cdot 2 f_{\max}$, 100 kHz převodník je vhodný pro aplikace s rychlostmi do 100 m/s.

4.3.5 PC s ovládacím softwarem

Nároky na počítač z hlediska výkonu a operační paměti nejsou vysoké. Důležitá je ovšem kompatibilita jednotlivých zařízení. Ovladače CTA, posuvného systému, A/D převodníku musí být schopny pracovat pod jedním operačním systémem a musí být možné ovládat je řídicím softwarem. PC musí být osazeno dostatečným množstvím sériových portů pro připojení jednotlivých zařízení. Samotný software nejenže ovládá zároveň všechny komponenty, ale umožňuje i automatické nastavení můstku a zařízení pro úpravu signálu, je také možné automatické provedení rychlostní i směrové kalibrace. Získaná data jsou redukována a převedena do požadovaných veličin.

4.3.6 Posuvný systém

Posuvný (traverzovací) systém je nutný v případě, že experiment vyžaduje pohyb sondy do jednotlivých bodů měření. Většinou je možný pohyb ve třech osách, v případě, že je použita k měření SY sonda, která vyžaduje rotaci kolem vlastní osy, bývá posuvný systém navíc osazen otočným zařízením. Moderní posuvné systémy jsou schopny posuvu až 0,1 mm s přesností 0,01 mm. Je nutné systém umístit tak, aby neovlivňoval zkoumané proudění.

4.3.7 Kalibrační sestava

Kalibrační sestava není přímou součástí měřicí trasy, patří ovšem mezi důležité komponenty měřicího systému. Skládá se z kalibrátoru, ke kterému je připevněn otočný držák sond, mikromanometru a regulovatelného přívodu tlakového vzduchu. Kalibrátor je možné dle potřeby osadit tryskami různých průměrů. Tlakový výstup na kalibrátoru je napojen vhodnou hadičkou k mikromanometru. Tato kalibrační sestava umožňuje kalibrovat v rozmezí rychlostí v řádech centimetrů za sekundu až do stovek m/s. Kalibraci je také možné provádět v aerodynamickém tunelu, kde je dynamický tlak měřen Pitotovou trubicí. Rozsah rychlostí je menší s maximální rychlostí do 50 m/s.

4.4 Softwarové nastavení

Jsou-li jednotlivé komponenty měřicí trasy propojeny a anemometr v provozu, přichází na řadu spuštění programu SreamWare. Založí se nový projekt a vybere použitý A/D převodník, po potvrzení se otevře okno **systémová konfigurace**.

4.4.1 Systémová konfigurace

Systémová konfigurace slouží k sestavení měřicí trasy v programu. Nejdříve se volí anemometr (frame), zvolí se sériový port, ke kterému je připojen, v případě, že byl zvolen správně, zobrazí se v okně rám se všemi kanály, které jsou v provozu. Zvolíme použitou sondu, držák, kabely. V případě, že je použita teplotní sonda, přidáme ji také. Důležité je, aby si v nastavení odpovídaly výstupy kanálů anemometru se vstupy A/D převodníku.

4.4.2 Hardwarové nastavení

V hardwarovém nastavení je možné nastavit parametry můstku, frekvenčních filtrů, nastavit minimální hodnotu měřeného napětí, zesílení signálu a také provést dynamické nastavení můstku, které vede k optimalizaci frekvenčního pásma. Výrobce dodává zařízení ve standardním hardwarovém nastavení, které je vhodné k běžným měřením, takže obvykle není potřeba jednotlivé prvky přenastavovat a tak tomu bylo i při měření v této práci. Při každém měření je ovšem nutné nastavit pracovní teplotu senzoru, což se provádí automaticky v sekci *nastavení žhavení (overheat adjustment)*, provede se změření odporu jednotlivých senzorů při dané teplotě okolí, sonda nesmí být v tomto okamžiku vystavena proudu a dle žhavicího poměru (při měření proudění vzduchu je standardně nastavena hodnota $a = 0,8$) a při standardním nastavení můstku 1:20 se nastaví odpor odporové dekády na levém rameni můstku a tím pracovní teplota senzoru. Tímto získáme počáteční bod kalibrační křivky ($U = 0$ m/s).

4.5 Kalibrace

4.5.1 Rychlostní kalibrace

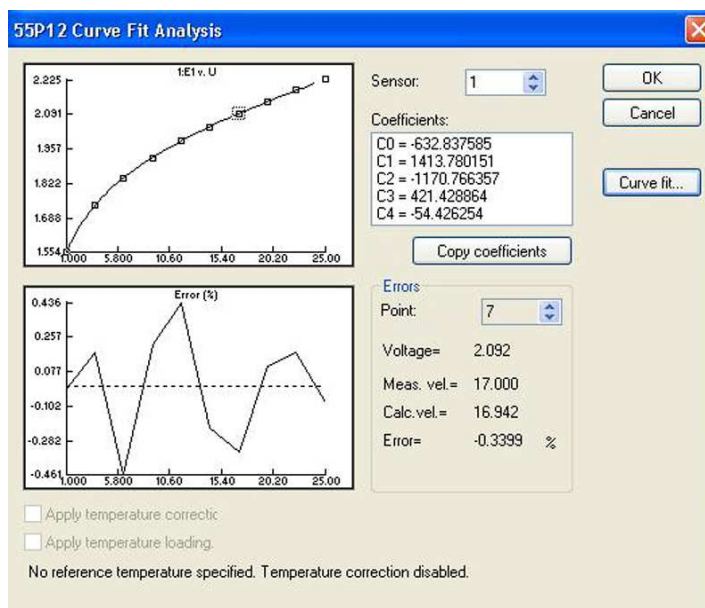
Prvním krokem rychlostní kalibrace je korektní upevnění sondy v manipulátoru. Sonda musí být upevněna ve vzdálenosti přibližně jednoho průměru vyústky kalibrátoru. Orientace sondy během kalibrace odpovídá orientaci během experimentu. 2D a 3D sondy se upevňují ve směru rovnoběžném se směrem proudu, 1D sondy se upevňují v poloze, kdy je drátek kolmý na proud. Samotná rychlostní kalibrace spočívá v přiřazení změřeného napětí anemometrem k rychlosti nastavené pomocí mikromanometru, která se získá přepočtem z měřeného dynamického tlaku. Během snímání se zaznamenává teplota okolí a atmosférický tlak. Pro konstrukci kalibrační křivky je potřeba minimálně deseti bodů naměřených v rozsahu rychlostí předpokládaných během následného experimentu. Získané body je možné proložit buď polynomem (většinou 4. řádu), (rov. 4-3), nebo exponenciální funkcí (rov. 4-4), která je méně přesná a používá se spíše při měřeních s menším rozpětím rychlostí. Proměnná n se mění do té doby, dokud nejsou chyby v přijatelných mezích, vhodná startovní hodnota je 0,45. Obrázky 4-6 a 4-7 jsou ilustrační a jsou na nich zaznamenány kalibrační křivky, jejich funkční koeficienty a chyby jednotlivých rychlostí (tzn. odchylky naměřených hodnot od kalibrační křivky) [2], [4], [10].

$$U = C_0 + C_1E + C_2E^2 + C_3E^3 + C_4E^4 \quad (4-3)$$

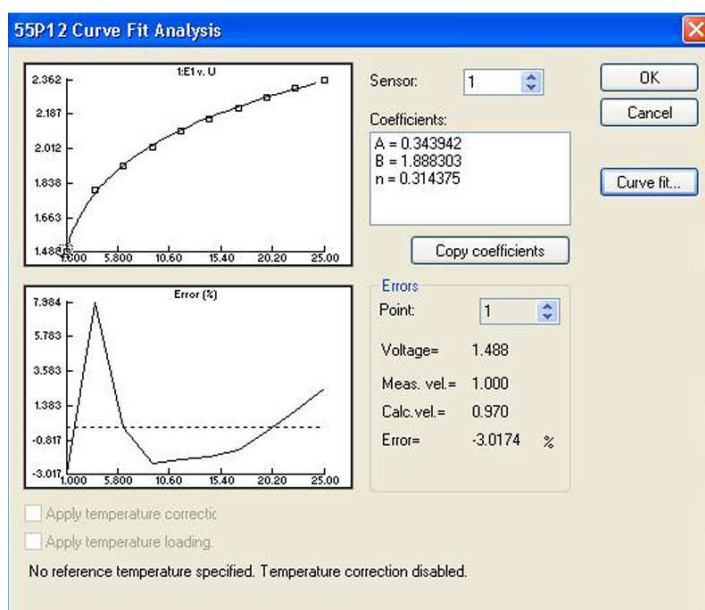
kde: U je rychlost ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)
 E je změřené napětí (V)
 C_0, \dots, C_4 jsou koeficienty kalibrační křivky (-)

$$E = A + B U^n \quad (4-4)$$

kde: E je změřené napětí (V)
 U je rychlost ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)
 A, B, n jsou koeficienty kalibrační křivky (-)



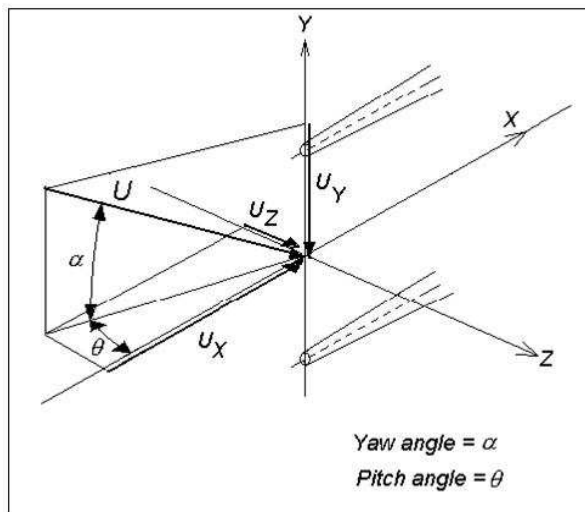
Obr. 4-6: Kalibrační křivka – konstrukce polynomem 4. řádu



Obr. 4-7: Kalibrační křivka – konstrukce exponenciálou

4.5.2 Směrová kalibrace

Je-li měřeno tří rozměrné proudění je potřeba znát koeficienty citlivosti senzorů k a h na směr proudění, které slouží k rozkladu získaných hodnot efektivní rychlosti do jednotlivých složek. Koeficient k vyjadřuje citlivost senzoru na směr, který je určen úhlem α , koeficient h je citlivost senzoru na směr určený úhlem θ (viz obrázek 4-8) [10].



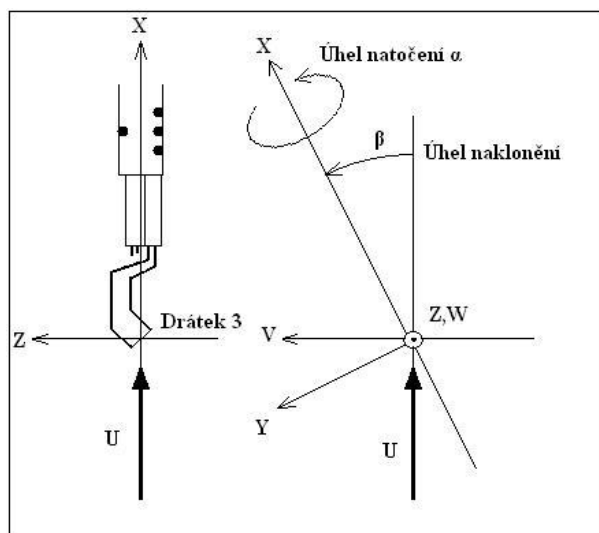
Obr. 4-8: Schéma

$$V_e^2 = U_x^2 + k^2 U_y^2 + h^2 U_z^2 \quad (4-5)$$

kde: V_e je efektivní rychlost ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)
 U_x, U_y, U_z jsou složky rychlosti v souřadném systému drátku ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)
 k, h jsou citlivostní koeficienty (-)

Směrová kalibrace 3D sondy

Sonda se umísťuje do držáku v poloze, kdy je osa těla sondy rovnoběžná s proudem. Drátek číslo 3 je natočen do roviny XZ. Následně je sonda nakloněna kolem osy Z s úhlem naklonění β , ten se volí podle v experimentu předpokládaného, maximálního úhlu mezi vektorem rychlosti a osou těla sondy. Většinou se volí úhel $\beta = 30^\circ$. Kalibrace se následně provádí při konstantní rychlosti, která je rovna střední hodnotě z rychlostí použitých v rychlostní kalibraci. Doporučuje se provést kalibraci ve 24 natočeních s přírůstkovým úhlem $\alpha = 15^\circ$. Pro každý drátek následně z rovnic 4-6, 4-7, 4-8 získáme koeficienty k a h (celkem 24 x 3 hodnot pro jednotlivý koeficient), které se zprůměrují a pro danou sondu se pak použijí jen výsledné průměrné hodnoty k a h [10].



Obr. 4-9: Orientace 3D sondy při směrové kalibraci

Výpočet složek rychlosti v souřadném systému sondy

Známe koeficienty k a h (získáme směrovou kalibrací, případně použijeme tabulkové hodnoty). Změříme hodnoty U_{cal1} , U_{cal2} , U_{cal3} , pak z následujících rovnic vypočteme rychlosti v souřadném systému drátku.

$$k_1^2 U_1^2 + U_2^2 + h_1^2 U_3^2 = (1 + k_1^2 + h_1^2) \cos^2 35,3 U_{cal1}^2 \quad (4-6)$$

$$h_2^2 U_1^2 + k_2^2 U_2^2 + U_3^2 = (1 + k_2^2 + h_2^2) \cos^2 35,3 U_{cal2}^2 \quad (4-7)$$

$$U_1^2 + h_3^2 U_2^2 + k_3^2 U_3^2 = (1 + k_3^2 + h_3^2) \cos^2 35,3 U_{cal3}^2 \quad (4-8)$$

kde: U_1, U_2, U_3 jsou rychlosti v souřadném systému drátku ($m \cdot s^{-1}$)
 $U_{cal1}, U_{cal2}, U_{cal3}$ jsou rychlosti na jednotlivých drátcích odpovídající rychlostní kalibraci ($m \cdot s^{-1}$)
 k_n, h_n jsou citlivostní koeficienty (-)

Známe-li hodnoty U_1, U_2, U_3 získáme požadované rychlosti v souřadném systému sondy U, V, W přepočtem z rovnic:

$$U = U_1 \cos 54,74^\circ + U_2 \cos 54,74^\circ + U_3 \cos 54,74^\circ \quad (4-9)$$

$$V = - U_1 \cos 45^\circ - U_2 \cos 135^\circ + U_3 \cos 90^\circ \quad (4-10)$$

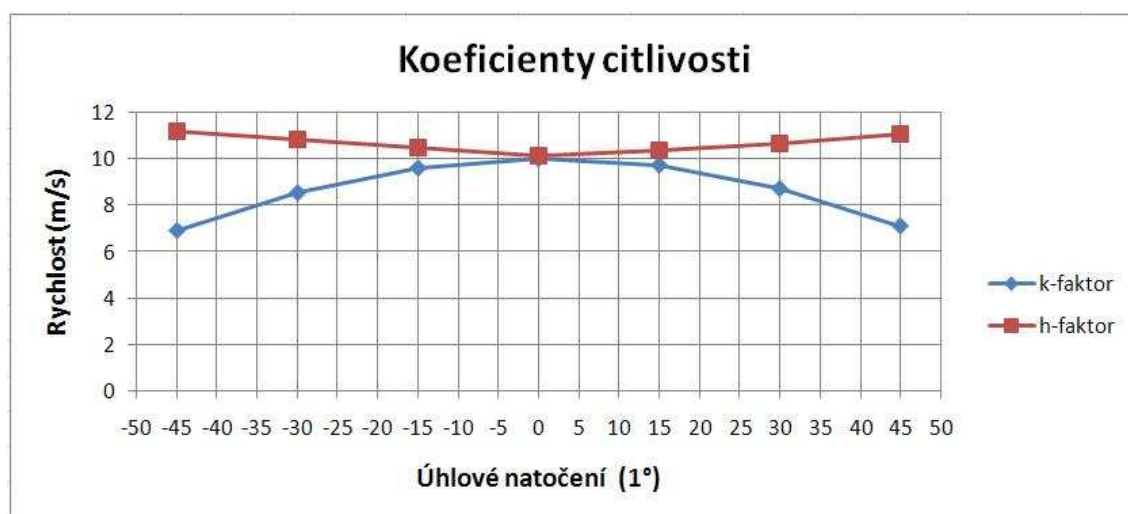
$$W = - U_1 \cos 114,09^\circ - U_2 \cos 114,09^\circ - U_3 \cos 35,26^\circ \quad (4-11)$$

Tyto výpočty jsou automaticky prováděny softwarem StreamWare.

Směrová kalibrace SY sondy

Sonda se upne do rotačního držáku v poloze odpovídající poloze při experimentu, v této poloze je následně při konstantní rychlosti, nastavené pomocí mikromanometru, natáčena do potřebných poloh v rozmezí úhlů přepokládaných během experimentu. Pro získání koeficientu k se natáčelo kolem osy těla sondy v rozmezí $\alpha = \pm 45^\circ$ v sedmi

natočeních, pro h se natáčelo kolem osy senzoru v rozmezí $\theta = \pm 45$ také v sedmi natočeních [2].



Obr. 4-10: Znáznornění citlivosti sondy na směr proudění

Z rovnic 4-12 a 4-13 získáme konečné hodnoty koeficientů.

$$h = \frac{1}{\sin \theta} \cdot \left[\left(\frac{E^2(\theta) - A}{E^2(0) - A} \right)^{\frac{2}{n}} - \cos^2 \theta \right]^{\frac{1}{2}} \quad (4-12)$$

$$k = \frac{1}{\sin \alpha} \cdot \left[\left(\frac{E^2(\alpha) - A}{E^2(0) - A} \right)^{\frac{2}{n}} - \cos^2 \alpha \right]^{\frac{1}{2}} \quad (4-13)$$

kde: α, θ jsou úhly natočení (1°)
 $E(\theta)$ je napětí naměřené při daném určitém natočení (V)
 $E(0)$ je napětí naměřené v poloze sondy, která odpovídá rychlostní kalibraci (V)
 A, B, n jsou kalibrační koeficienty (-)

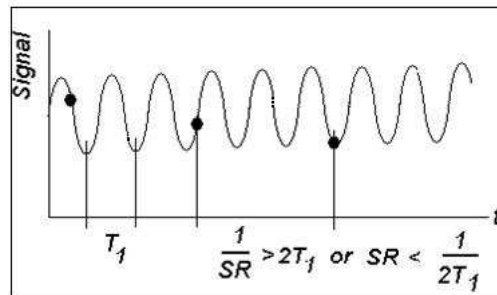
Postup výpočtu jednotlivých komponent rychlosti je popsán v kapitole 7.1.

4.6 Stanovení celkové rychlosti a celkové intenzity turbulence

Anemometr snímá s vzorkovací frekvencí (SR) daný počet vzorků (N) v této práci SR = 1kHz, N = 2048 vzorků stanoveno dle rovnic 4-14, 4-15, jednotlivé veličiny se určí dle předpokládaných výsledků experimentu. Anemometr tedy získá N hodnot, ze kterých se dle 4-16 spočítá časově střední hodnota dané složky rychlosti ($U_{\text{mean}}, V_{\text{mean}}, W_{\text{mean}}$), velikost celkové rychlosti se stanoví z rovnice 4-17. Výpočet složek standardní hodnoty fluktuace rychlosti ($U_{\text{RMS}}, V_{\text{RMS}}, W_{\text{RMS}}$) se určí z rovnice 4-18 a podle rovnice 4-19 získáme konečnou složku intenzity turbulence. Celkovou intenzitu turbulence získáme pak dosazením do rovnice 4-20 [10].

$$SR \leq \frac{1}{2 \cdot T_1}, 2 \cdot SR \leq f_1 \quad (4-14, 4-15)$$

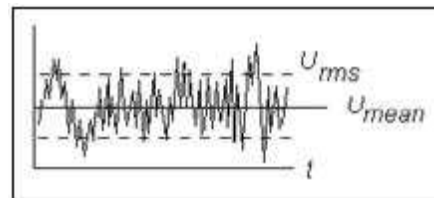
kde: T_1 je perioda signálu (s)
 f_1 je frekvence signálu (Hz)



Obr.4-12: Časová charakteristika signálu

$$N = \left(\frac{1}{u} \cdot \left(\frac{z_a}{2} \right) \cdot Tu \right)^2 \quad (4-15)$$

kde: u je předpokládaná nejistota měření rychlosti (%)
 $\frac{z_a}{2}$ je proměnná závislá na úrovni spolehlivosti 1-a (%)



Obr. 4-11: Časový průběh rychlosti

Tu je předpokládaná intenzita turbulence (%)

(v této práci bylo voleno: $u = 1\%$, $1-a = 98\% \rightarrow \frac{z_a}{2} = 2,33$, $Tu = 20\% \rightarrow N = 2048$)

$$U_{mean} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N U_i \quad (4-16)$$

$$C_{celk} = \sqrt{U_{MEAN}^2 + V_{MEAN}^2 + W_{MEAN}^2} \quad (4-17)$$

$$U_{RMS} = \sqrt{\left(\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (U_i - U_{mean})^2 \right)} \quad (4-18)$$

$$Tu = \frac{U_{RMS}}{U_{mean}} \cdot 100 \text{ (%) } \quad (4-19)$$

$$Tu_{celk} = \frac{\sqrt{\frac{1}{3} \cdot (U_{RMS}^2 + V_{RMS}^2 + W_{RMS}^2)}}{C_{celk}} \cdot 100 \text{ (%) } \quad (4-20)$$

5 Popis měřeného objektu

5.1 Palubní deska

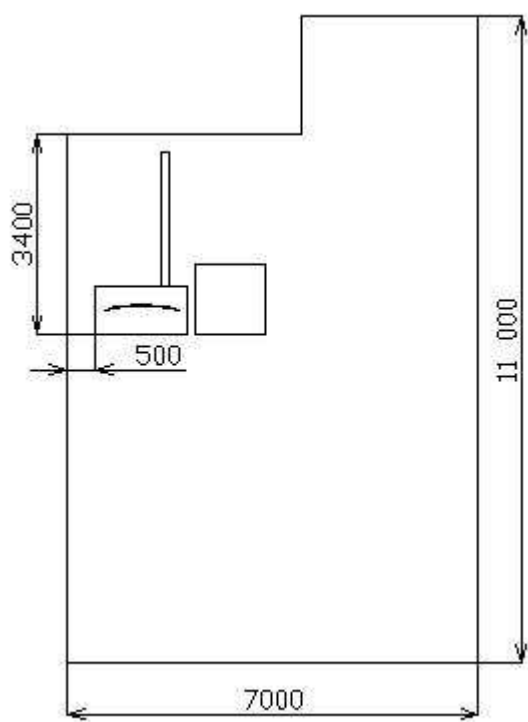
Palubní deska je znázorněna na obrázcích 5-1, 5-2. Jedná se čistě o samostatný díl, bez dalších souvisejících částí, jako jsou okna, dveře, střecha. Deska byla upevněna do stojanu dodaného Škoda Auto a.s., který zaručoval polohu totožnou s polohou v reálném automobilu. Horizontální poloha desky byla vyrovnána pomocí vodováhy. Vzduch byl nasáván trubicí o průměru 150 mm, která byla přes koleno a redukci připevněna na čtyřhranný přívod vzduchu přístrojové desky. Na vstupu do trubky byla umístěna voština, z důvodu usměrnění proudění. V této práci se kontinuální měření průtoku neprovádělo, v předešlé práci se totiž prokázalo, že průtok zůstává pro dané nastavení konstantní o velikosti $340 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$. Trasa přívodu vzduchu byla zachována ve stejné podobě jako v předchozí práci. Podrobnější geometrie trubky je znázorněna na obrázku 5-5. Všechny přiváděný vzduch procházel jen defrostovou mřížkou, veškeré ostatní otvory byly uzavřeny, zalepeny. Aby bylo možné porovnat výsledky získané v této práci s výsledky předešlé práce, bylo měření provedeno bez krycího plechu mřížky, který je v reálném automobilu umístěn. Ovladač rozvodu vzduchu byl nastaven v poloze pro ofukování čelního skla. Ovladač intenzity přiváděného vzduchu byl nastaven do maximální polohy (poloha 4). Regulátor teploty byl vyřazen z provozu, vzduch nebyl ohříván. Ventilátor byl napájen stabilizovaným zdrojem OK2EZ s garantovaným napětím $13,8 \text{ V} \pm 0,1 \text{ V}$, který může dodávat proud až 30 A. Obrázky 5-4, 5-5, 5-6 jsou získány z předešlé práce [11], [13].



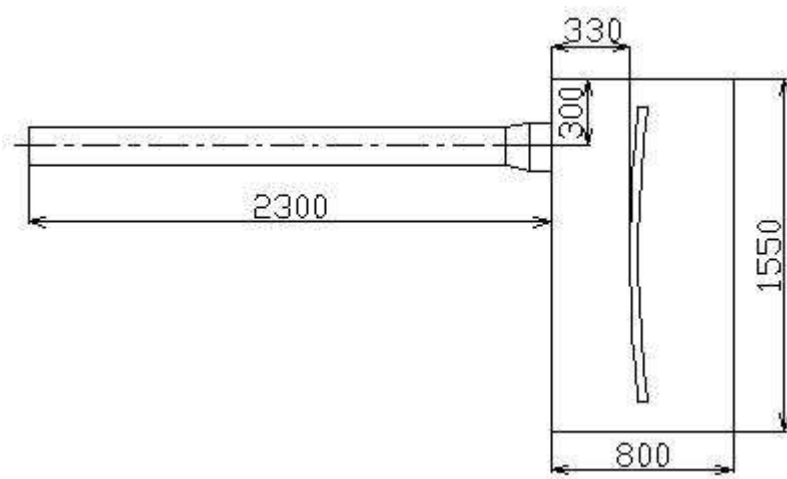
Obr. 5-1: Umístění přístrojové desky v laboratoři - pohled zepřed



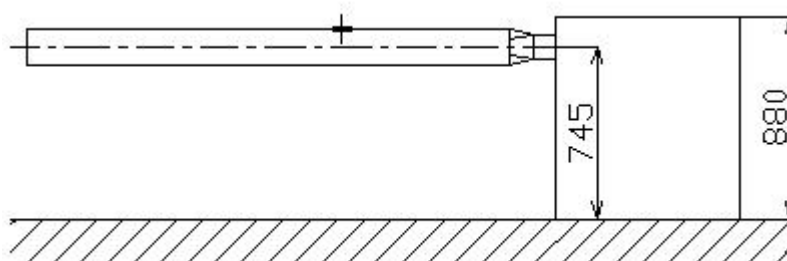
Obr. 5-2: Umístění přístrojové desky v laboratoři - pohled zezadu



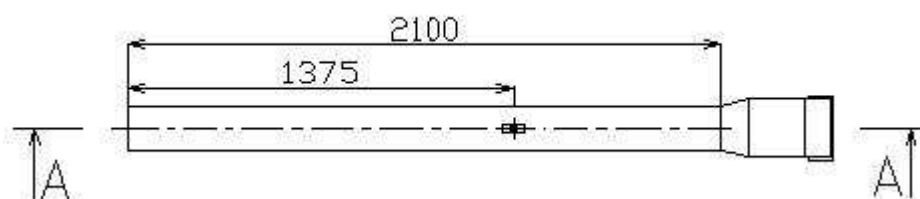
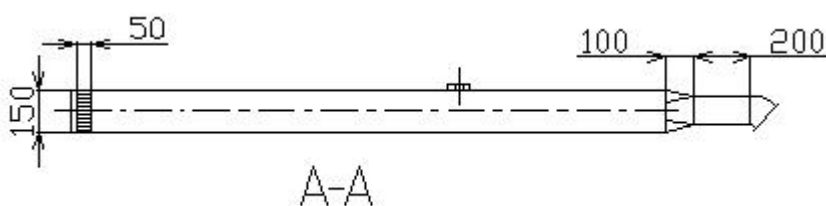
Obr. 5-3: Schéma umístění přístrojové desky v laboratoři



Obr. 5-4: Schéma desky a sací trubky se základními rozměry – pohled shora



Obr. 5-5: Schéma desky a sací trubky se základními rozměry – pohled z boku



Obr. 5-6: Schéma sací roury se základními rozměry

5.2 Geometrie mřížky

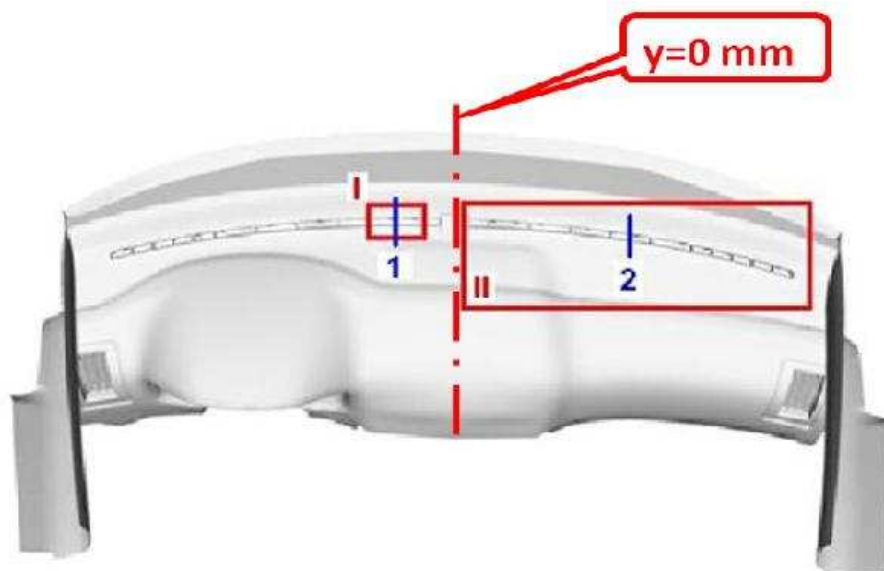
Na obrázku 5-7 je znázorněna pravá vyústka (defrostová mřížka), která přívodem vzduchu pokrývá prostor spolujezdce. Mřížka je rozdělena jednak podélně, malé výdechy blíže k posádce, které zajišťují přívod čerstvého vzduchu. K ofukování čelního skla slouží výdechy (segmenty) umístěny blíže ke sklu. Tato část mřížky o šířce 13 mm je rozdělena na 5 velkých segmentů každý o délce 70 mm a 6 malých segmentů o délce 35 mm. Výška dělicích lamel je 17 mm. Levá mřížka pokrývající prostor řidiče je geometricky totožná, ale je zrcadlově obrácená [11].



Obr. 5-7: Pravá defrostová mřížka

6 Měření roviny a profily

Obrázek 6-1 znázorňuje přístrojovou desku s vyznačenými oblastmi měření. Oblast I ohraničuje první velký výdech u osy vozu na levé vyústce. Oblast II ohraničuje celou pravou vyústku. Modře jsou zachyceny profily 1 a 2. Čerchovaně je vyznačen střed vozu [13].



Obr. 6-1: Přístrojová deska s oblastmi měření

Oblast I

Měření probíhalo ve třech horizontálních rovinách a pěti vertikálních. Horizontální roviny jsou značeny podle souřadnice Z např. R715 (rovina Z = 715 mm), vertikální jako RV1 (rovina vertikální 1) až RV5 (rovina vertikální 5).

R715 (na obrázku 6-2 červeně)

poloha Z = 715 mm

hustota bodů 4 x 4 mm

rozsah 11 x 26 x 1 bodů

R720 (na obrázku 6-2 zeleně)

poloha Z = 720 mm

hustota bodů 4 x 4 mm

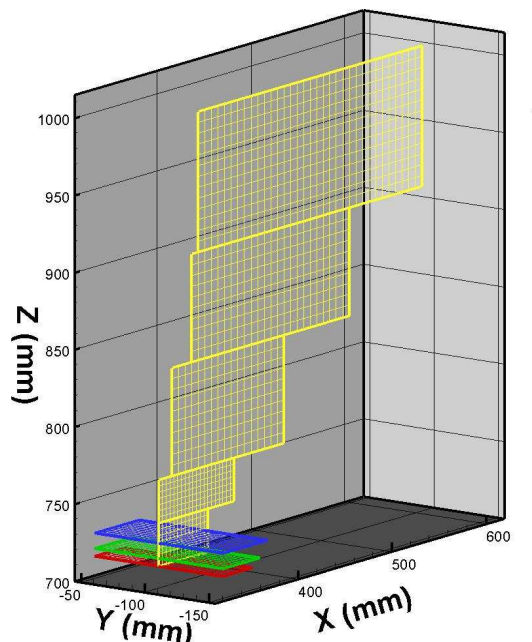
rozsah 13 x 26 x 1 bodů

R730 (na obrázku 6-2 modře)

poloha Z = 730 mm

hustota bodů 4 x 4 mm

rozsah 14 x 26 x 1 bodů



Obr. 6-2: Měřicí roviny nad výdechem u středu vozu

RV1 (na obrázku 6-2 žlutě 1. od spodu)

poloha Y = -100 mm

hustota bodů 4 x 4 mm

rozsah 14 x 1 x 8 bodů

RV2 (na obrázku 6-2 žlutě 2. od spodu)

poloha Y = -100 mm

hustota bodů 4 x 4 mm

rozsah 21 x 1 x 8 bodů

RV3 (na obrázku 6-2 žlutě 3. od spodu)

poloha Y = -100 mm

hustota bodů 7 x 7 mm

rozsah 21 x 1 x 11 bodů

RV4 (na obrázku 6-2 žlutě 4. od spodu)

poloha Y = -100 mm

hustota bodů 7 x 7 mm

rozsah 25 x 1 x 11 bodů

RV5 (na obrázku 6-2 žlutě 5. od spodu)

poloha Y = -100 mm

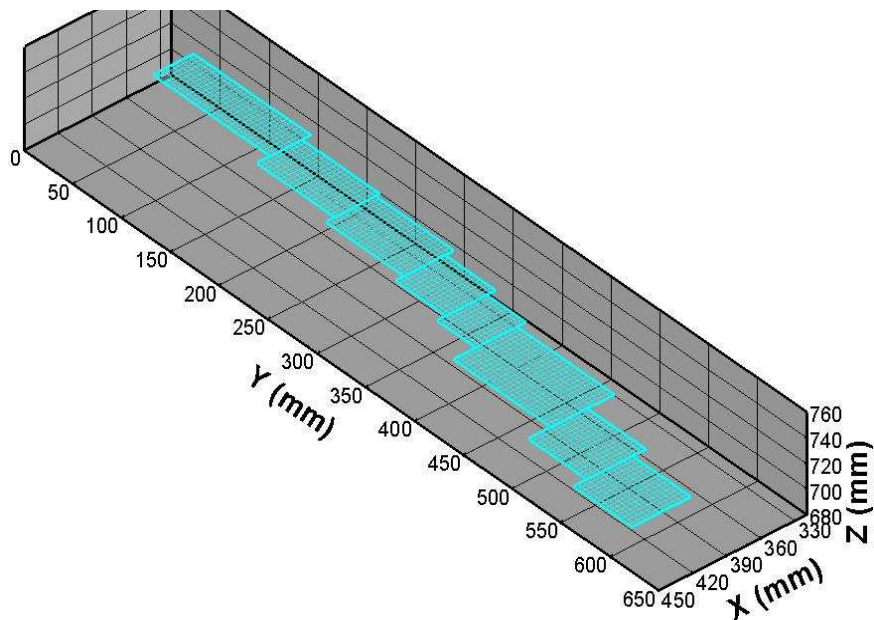
hustota bodů 7 x 7 mm

rozsah 35 x 1 x 14 bodů

Oblast II

Proměřena celá pravá vyústka v osmi horizontálních rovinách, všechny ve výšce $Z = 715$ mm. Hustota bodů jednotlivých mřížek byla totožná 4×4 mm. Jednotlivé roviny se liší rozsahem. Roviny jsou značeny jako R1(rovina 1) až R8 (rovina 8), R1 leží u osy vozu.

- R1** (10 x 31 bodů)
- R2** (11 x 21 bodů)
- R3** (12 x 21 bodů)
- R4** (12 x 14 bodů)
- R5** (12 x 11 bodů)
- R6** (15 x 26 bodů)
- R7** (14 x 16 bodů)
- R8** (14 x 16 bodů)



Obr. 6-3: Měřící roviny nad pravou rozmrazovací mřížkou

Profily 1

Tři profily v poloze $Y = -100$ mm lišící se vzdáleností nad pravým výdechem. Jsou označeny jako P715, P720, P730. Hustota bodů je 4×4 mm.

- P715** ($Y = -100$ mm, $Z = 715$ mm, 10 bodů)
- P720** ($Y = -100$ mm, $Z = 720$ mm, 14 bodů)
- P730** ($Y = -100$ mm, $Z = 730$ mm, 16 bodů)

Profil 2

Jeden profil v poloze $Y = 300$ mm, označen P750, hustota bodů je 7×7 mm.

- P750** ($Y = 300$ mm, $Z = 750$ mm, 19 bodů)

7 Metodika měření

Existuje mnoho možných přístupů jak měřit trojrozměrné proudění. Lze využít prakticky všech typů sond. Platí ovšem pravidlo - čím jednodušší sonda, tím složitější pracovní postup. Primárně jsou k těmto měřením určeny sondy tří senzorové (drátkové, nebo vlákno – filmové) a také SY (Single Yawed) sondy s jedním šikmým drátkem. Jednotlivé přístupy mají svá specifika a budou podrobně rozebrány v následujících podkapitolách. Prvním krokem měření obou metodik bylo zkoordinování traverzovacího systému Dantec LightWeight se souřadným systémem přístrojové desky (automobilu), k tomu posloužil přesně definovaný bod A[366, 0, 704] (viz obr. 7-1).



Obr. 7-1: Poloha bodu A

7.1 Měření SY sondou

Použití SY sond má dlouhou historii a existuje několik popsanych postupů [2], [3], [6], [7], jak jimi měřit a následně vyhodnotit charakter trojrozměrného proudění. V této práci byla zvolena metoda popsána v článku [3], řešící podobný charakter proudění. Jedná se o metodu vícepolohovou, kdy se v každém bodě provede měření s deseti natočeními sondy. Tělo sondy je v proudu umístěno kolmo vzhledem k dominantní složce rychlosti. Vždy získáme efektivní hodnotu rychlosti a fluktuace. Tato data následně dosadíme do systému rovnic a vypočteme požadované veličiny. Znázorněny jsou rovnice pro výpočet komponent rychlostí, rovnice pro výpočet komponent fluktuací jsou obdobné, jen efektivní rychlost je nahrazena efektivní fluktuací. V této práci byl proveden pouze výpočet složek rychlosti, který je z hlediska porovnání s 2. metodou dostatečný.

$$SC = \sin^2 \alpha + k^2 \cos^2 \alpha$$

$$D_1 = 2^{0.5} (SC + h^2) / [2(SC + h^2)^{0.5}]$$

$$D_2 = (1 - k^2) \sin 2\alpha / [2(SC + h^2)^{0.5}]$$

$$D_3 = h^2 (1 - k^2) \sin 2\alpha / (SC + h^2)^{1.5}$$

$$D_4 = 3^{0.5} (SC - h^2) / [4(SC/4 + 3h^2/4)^{0.5}]$$

$$D_5 = (1 - k^2) \sin 2\alpha / [4(SC/4 + 3h^2/4)^{0.5}]$$

$$D_6 = 3^{0.5} h^2 (1 - k^2) \sin 2\alpha / [4(SC/4 + 3h^2/4)^{1.5}]$$

$$D_7 = (\sin^2 \alpha + h^2 \sin^2 \alpha) / h$$

$$D_8 = (\cos^2 \alpha + k^2 \sin^2 \alpha) / h$$

$$[(UV + uv) / W] = [h(V_{e,-90} - V_{e,+90})] / [(1 - k^2) \sin 2\alpha]$$

$$U_1 = \{[(V_{e,-45} - V_{e,+45}) - 2D_3 [(UV + uv) / W]] / 2D_1$$

$$U_2 = \{[(V_{e,-60} - V_{e,+60}) - 2D_6 [(UV + uv) / W]] / 2D_4$$

$$V_1 = \{[(V_{e,+45} - V_{e,-135}) + 2D_3 [(UV + uv) / W]] / 2D_2$$

$$V_2 = \{[(V_{e,+135} - V_{e,-45}) + 2D_3 [(UV + uv) / W]] / -2D_2$$

$$0 = 2hW^2 - (V_{e,+90} - V_{e,-90})W + (D_7 U^2 + D_8 V^2)$$

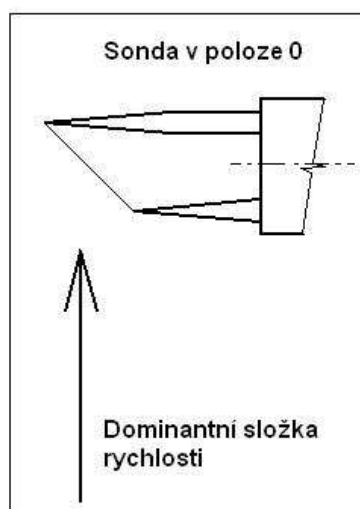
$$A = 2h$$

$$B = (V_{e,+90} - V_{e,-90})$$

$$C = (D_7 U^2 + D_8 V^2)$$

kde: α	je sklon drátku (1°)
k, h	jsou faktory citlivosti (-)
$V_{e, \alpha n}$	je efektivní rychlost pro jednotlivá natočení ($m s^{-1}$)
U	je složka rychlosti ve směru osy x
V	je složka rychlosti ve směru osy y
W	je složka rychlosti ve směru osy z
D_1 až D_8, SC	jsou koeficienty charakterizující použitou sondu (-)
A, B, C	jsou koeficienty kvadratické rovnice (-)

Měření bylo provedeno sondou Dantec 55P12, jedná se o miniaturní sondu s jedním skloněným drátkem, sklon drátku je 45° .



Obr. 7-2: Počáteční poloha SY sondy

Rameno držáku sondy bylo upevněno k traverzovacímu systému v horizontální poloze, což je patrné na obrázku (7.3). Abychom mohli tuto metodu použít, bylo třeba vyrobit kotouč s úhlovou stupnicí, který se upne na tělo držáku sondy (obrázek x1). Na upínací rameno byla následně přidána ryska z tenkého plechu k přesnému nastavování požadovaného natočení. Poloha 0 je znázorněna na obrázku (7.2), rovina drátku a vidlic je rovnoběžná s dominantní složkou rychlosti. Měření probíhalo v natočeních $\alpha_n = \pm 45^\circ, \pm 60^\circ, \pm 90^\circ, \pm 120^\circ, \pm 135^\circ$. Kladné natočení je ve směru hodinových ručiček.

Byl proměřen profil P750. Měření ve větší blízkosti přístrojové desky neumožnil úhlový kotouč. Vzorkovací frekvence byla nastavena na 1 kHz s počtem 2048 vzorků, což znamená přibližně 2 s snímání, pohyb mezi jednotlivými body trvá zhruba 1 s, systém po přesunu 3 s čeká, než dozní kmitání ramene. Doba měření jednoho bodu

při jednom natočení je tedy 6 s. Celková doba měření v jednom bodě je 60 s (10 natočení x 6 s).

Výhoda metody je horizontální poloha sondy, což umožní měření s instalovaným čelním sklem, použití 3D sondy by sice bylo možné, tělo sondy by bylo vychýleno do polohy kopírující sklo, ale z rozměrových důvodů by nebylo možné měřit v takové blízkosti, jakou umožní SY sonda. Navíc měření v této oblasti je vysoce riskantní z hlediska poškození sondy, z ekonomického hlediska je tedy vhodnější použití SY sondy.

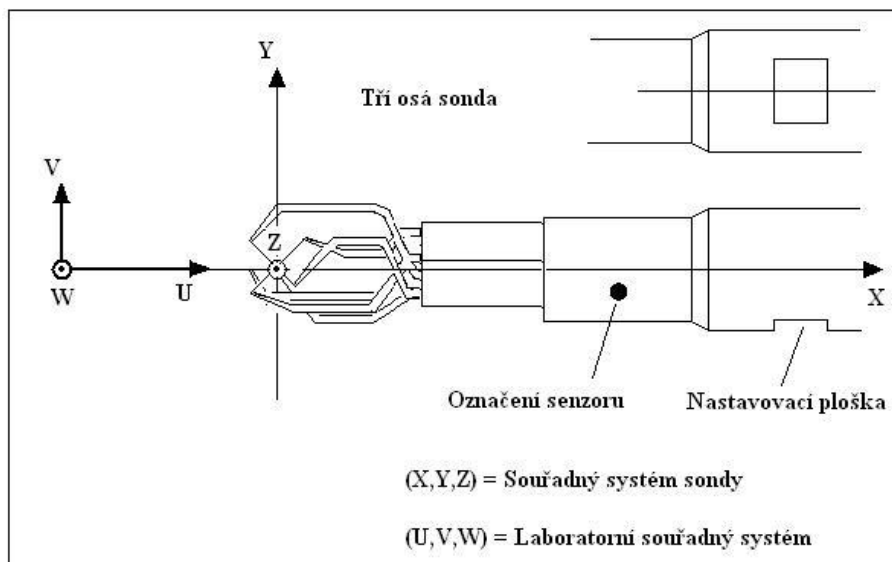


Obr. 7-3: *Poloha upevňovacího ramene a SY sondy při měření*

Rychlostní kalibrace byla provedena v horizontální poloze sondy, což odpovídá poloze v následném experimentu. Směrová kalibrace byla provedena pro získání obou koeficientů citlivosti. Jejich hodnoty se ovšem výrazně lišily od tabulkových, i přesto s nimi byl proveden zkušební výpočet, ale dle předpokladu byly při porovnání s výsledky poskytnutými 3D sondou výrazně odlišné. V konečné verzi byly použity tabulkové hodnoty, pro použitou sondu platí: $k = \sqrt{0,025}$, $h = \sqrt{1,1}$ [2].

7.2 Měření 3D sondou

Měření tříosou sondou je velmi jednoduché. Sonda poskytuje okamžitě tři složky rychlosti, tři složky fluktuace, ze kterých získáme odpovídající složky intenzity turbulence. V jednotlivých bodech tedy stačí měřit jen jednu. Umístění sondy do proudu je znázorněno na obrázku 7.4, osa těla sondy je rovnoběžná s dominantní složkou rychlosti, nastavovací ploška musí být v poloze kolmé k ose Y [10].



Obr. 7-4: Orientace 3D sondy

Měření bylo provedeno sondou 55R91, jedná se o sondu se třemi vlákno – filmovými senzory.

Rameno držáku sondy bylo k traverzovacímu systému upevněno vertikálně, viz obrázek 7-5. Měření probíhalo ve všech již zmíněných rovinách i profilech. Vertikální orientace sondy umožňuje provést měření i ve velmi malé vzdálenosti od přístrojové desky. Je však nutné vyhodnotit případné riziko poškození. Vzorkovací frekvence byla nastavena na 1 kHz s počtem 2048 vzorků, což znamená přibližně 2 s snímání, pohyb mezi jednotlivými body trvá zhruba 1 s, systém po přesunu 3 s čeká, než dozní kmitání ramene. Celková doba měření v jednom bodě je 6 s.



Obr. 7-4: Poloha upevňovacího ramene a 3D sondy při měření

Před každým měřením byla provedena standardní rychlostní kalibrace. Kalibrační body byly proloženy polynomem čtvrtého řádu. Směrová kalibrace byla provedena, ale hodnoty citlivostních koeficientů se výrazně lišily od tabulkových hodnot, což bylo pravděpodobně způsobeno chybným umístěním v manipulátoru, případně nepřesným nastavením jednotlivých natočení. Při současném vybavení, kdy je sonda otáčena manuálně, je prakticky nemožné získat přesné hodnoty koeficientů, z tohoto důvodu bylo při přepočtu využito tabulkových hodnot pro použitou sondu $k = \sqrt{0,04}$, $h = \sqrt{1,2}$ [10]. Navíc je třeba dodat, že provedená směrová kalibrace byla vyhodnocena jako

nejrizikovější z hlediska poškození sondy během celého experimentu. Důvodem byla několikanásobná manipulace se sondou do požadovaných natočení a to ve vzdálenosti přibližně 10 mm nad tryskou kalibrátoru.

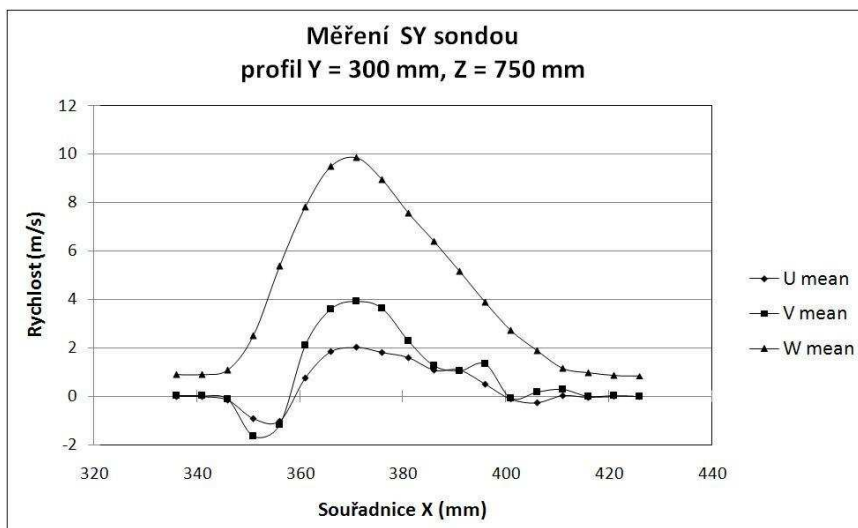
7.3 Měření parametrů okolního prostředí

Teplota okolí, atmosférický tlak a relativní vlhkost byly měřeny přístrojem Comet D4141, jejich znalost byla vyžadována pro vyhodnocení nejistoty měření. Hodnoty těchto veličin byly zaznamenávány před každým měřením a jsou uloženy v datových souborech.

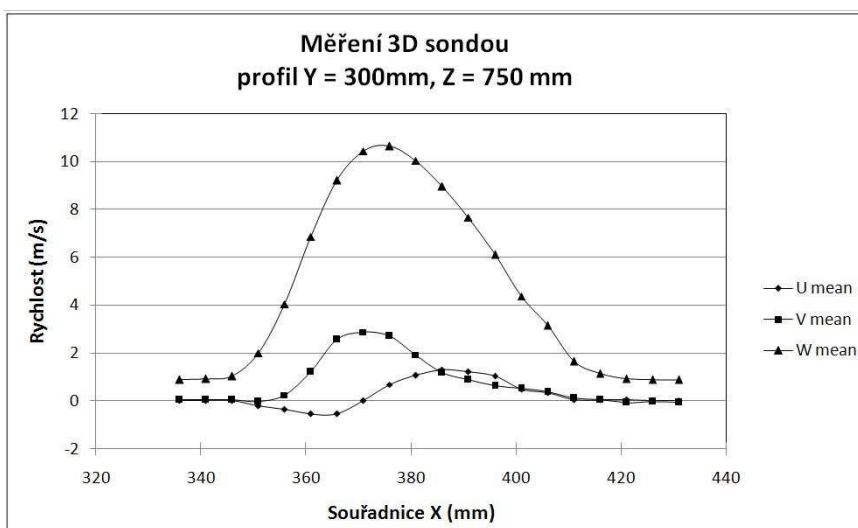
8 Výsledky

Získaná data byla exportována do programu Microsoft Excel, kde byla uspořádána a následně převedena do textových souborů, také zde byly vytvořeny grafy profilů rychlostí a intenzit turbulence. Byl proveden výpočet požadovaných veličin z dat získaných SY sondou. V programu Tecplot 9.0 byly vytvořeny 2D a 3D grafy.

8.1 Porovnání měření SY a 3D sondou

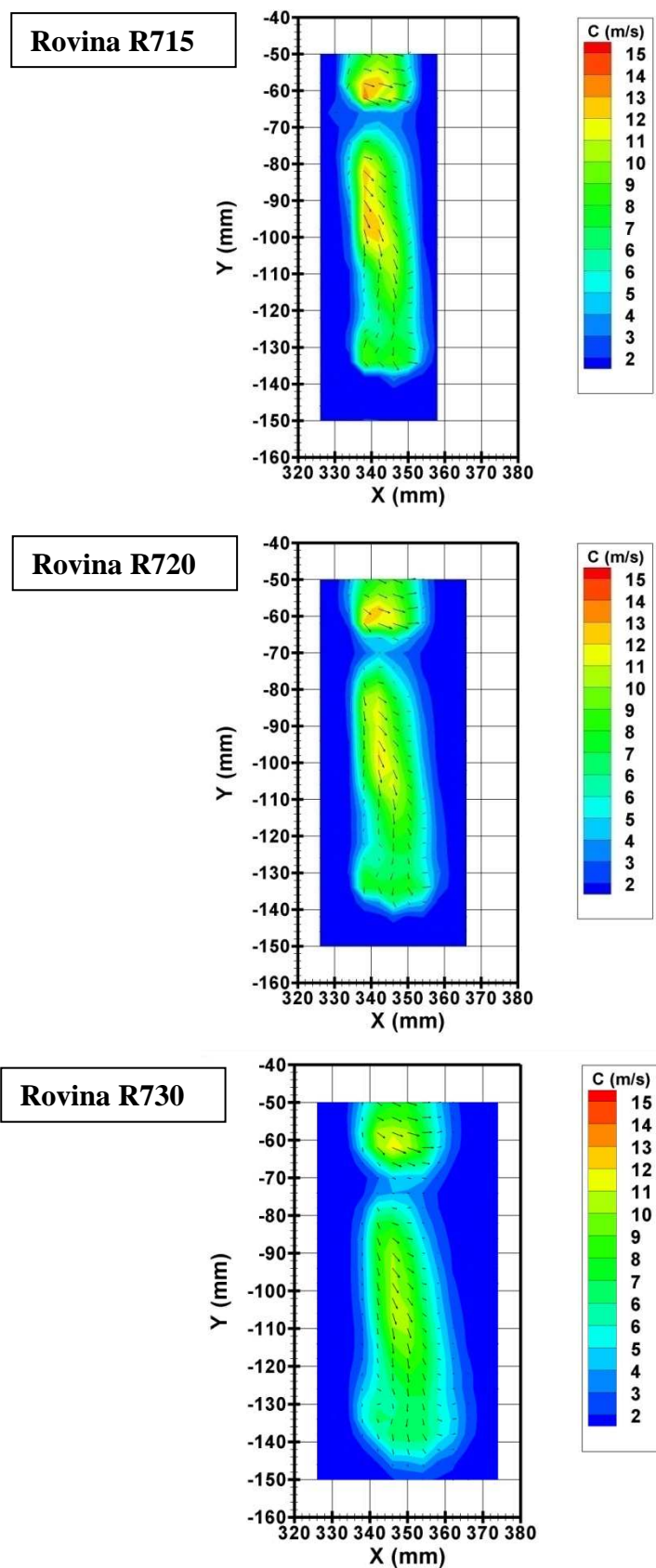


Obr. 8-1: Složky rychlosti naměřené SY sondou na profilu P750



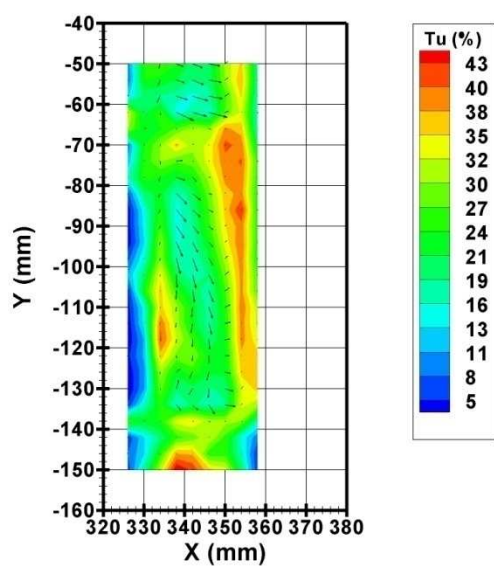
Obr. 8-2: Složky rychlosti naměřené 3D sondou na profilu P750

8.2 Grafické znázornění výsledků získaných 3D sondou

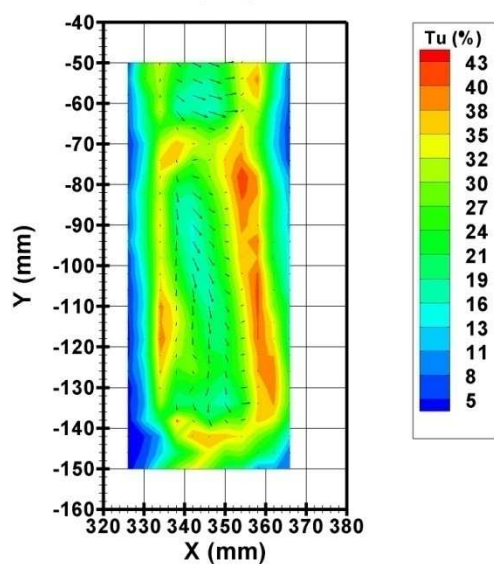


Obr. 8-3: Celková rychlost v jednotlivých rovinách

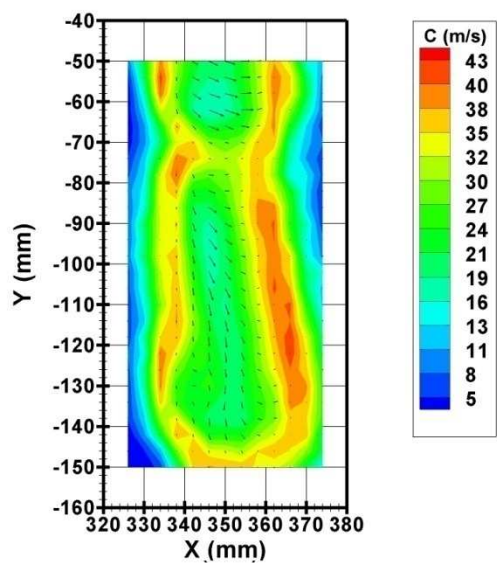
Rovina R715



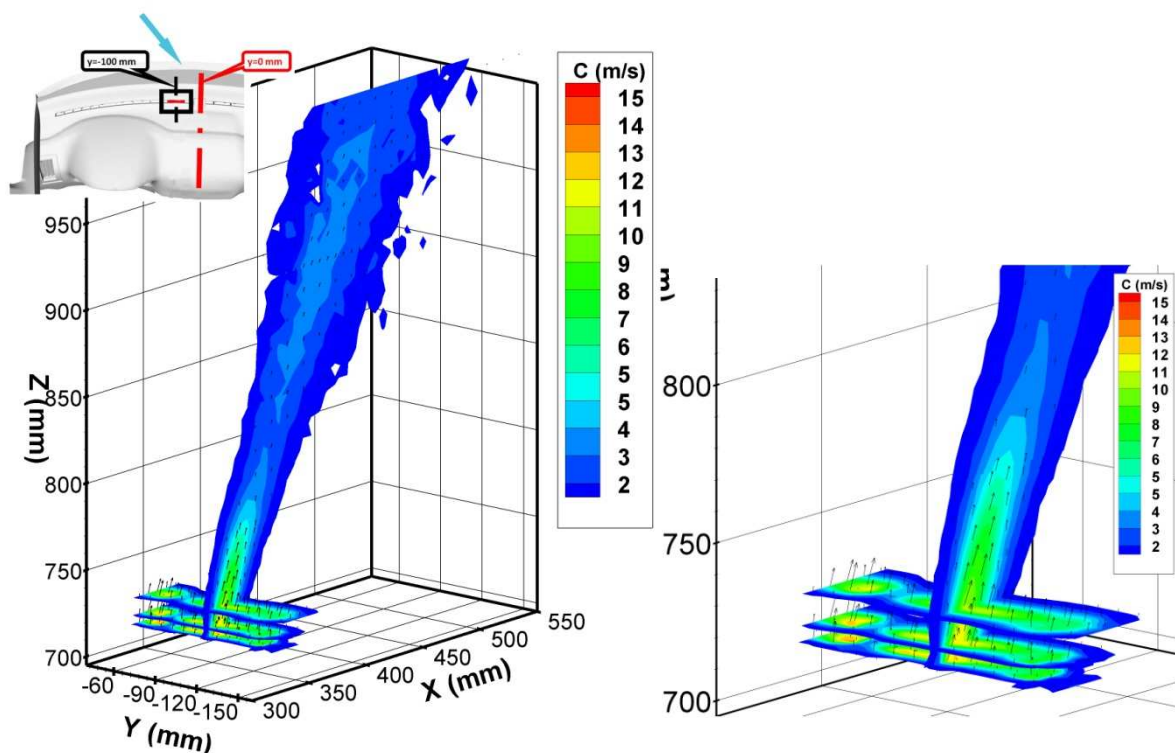
Rovina R720



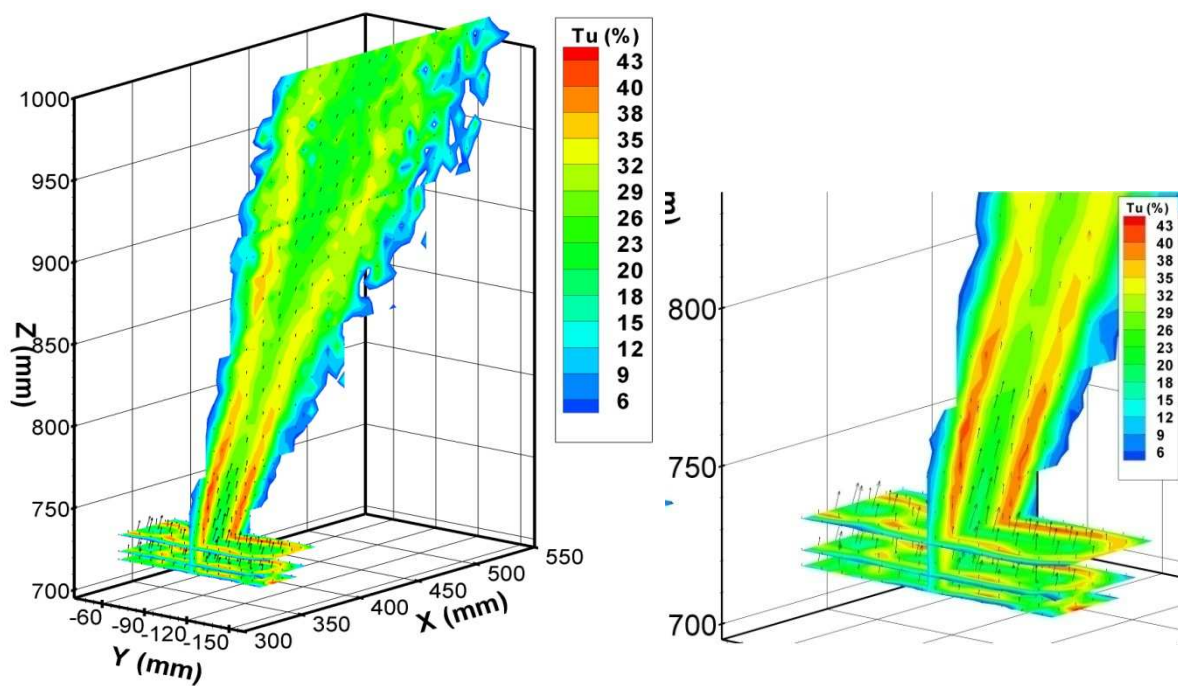
Rovina R730



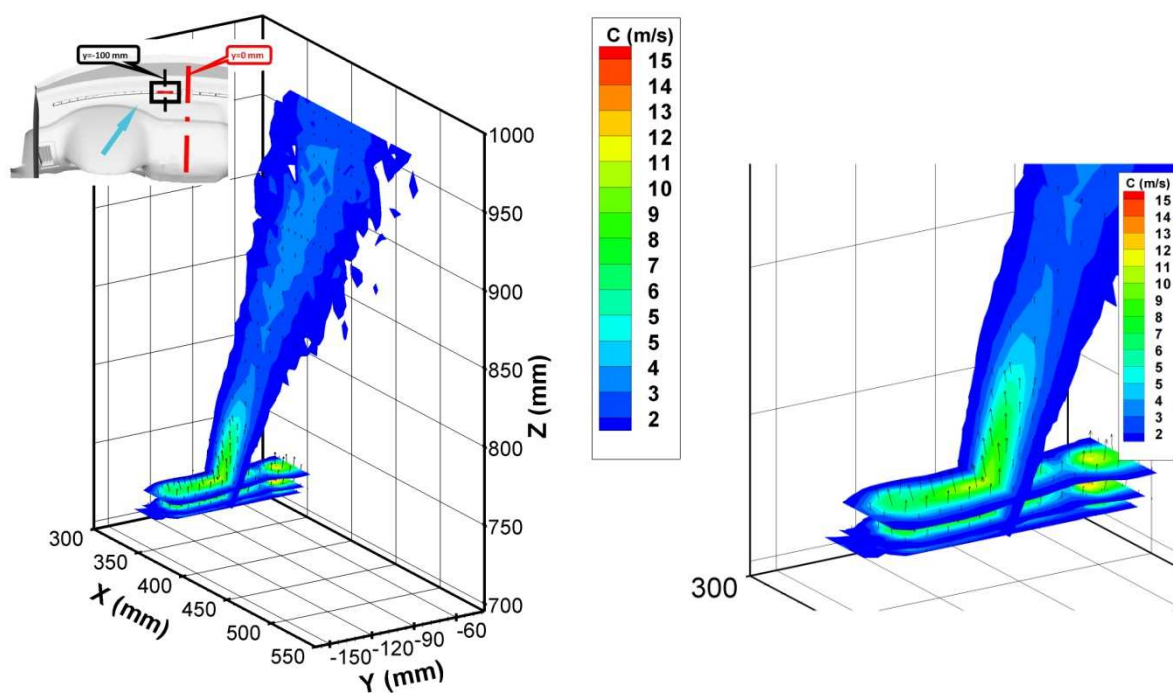
Obr. 8-4: Celková intenzita turbulence v jednotlivých rovinách



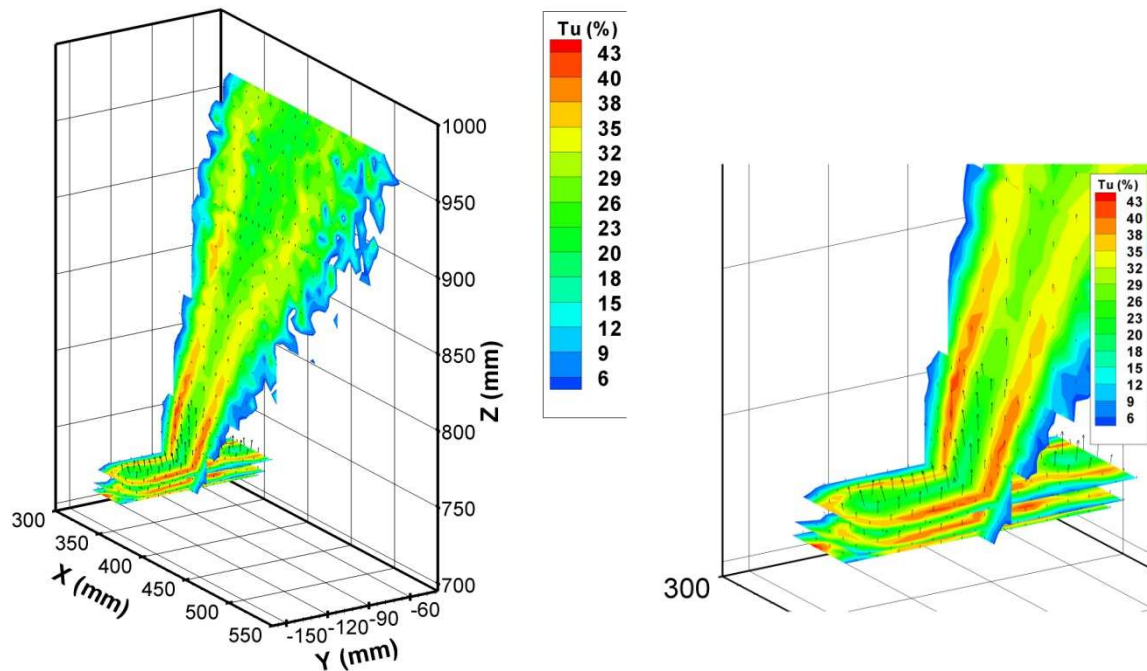
Obr. 8-5: Celková rychlost, pohled od předního levého kola, znázorněny všechny měřené roviny nad výdechem u středu přístrojové desky, vektory určují velikost a směr rychlosti, vpravo je znázorněn detail.



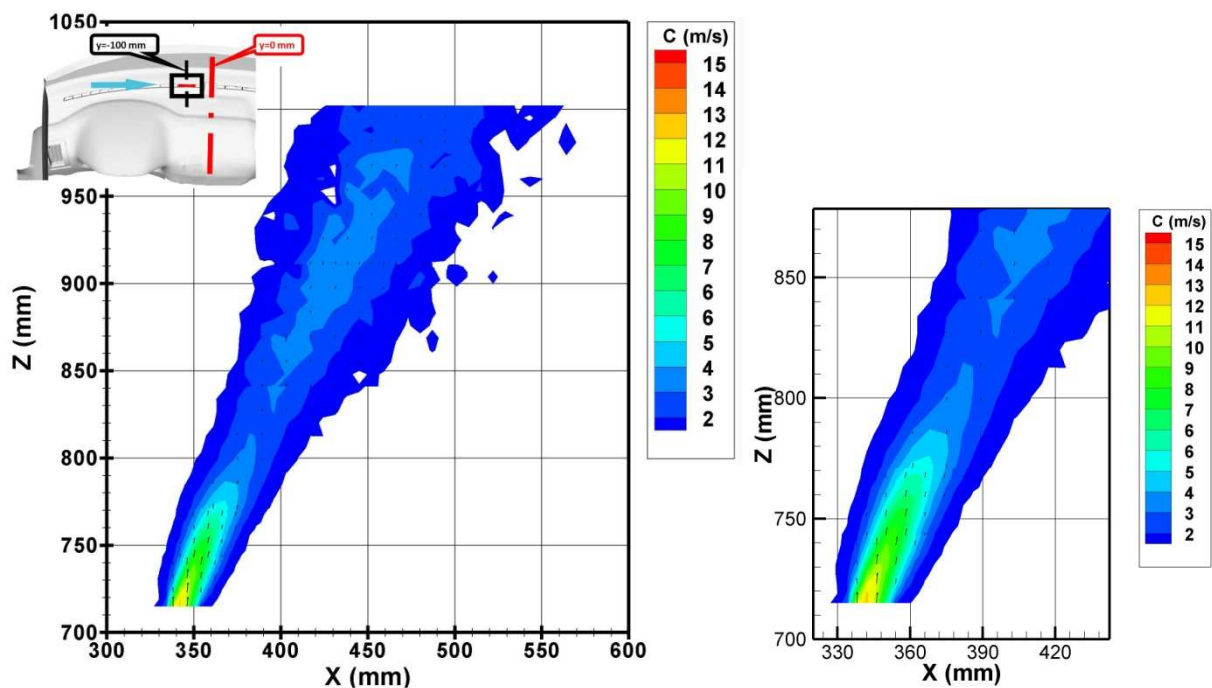
Obr. 8-6: Celková intenzita turbulence, pohled od předního levého kola, znázorněny všechny měřené roviny nad výdechem u středu přístrojové desky, vektory určují velikost a směr rychlosti, vpravo je znázorněn detail.



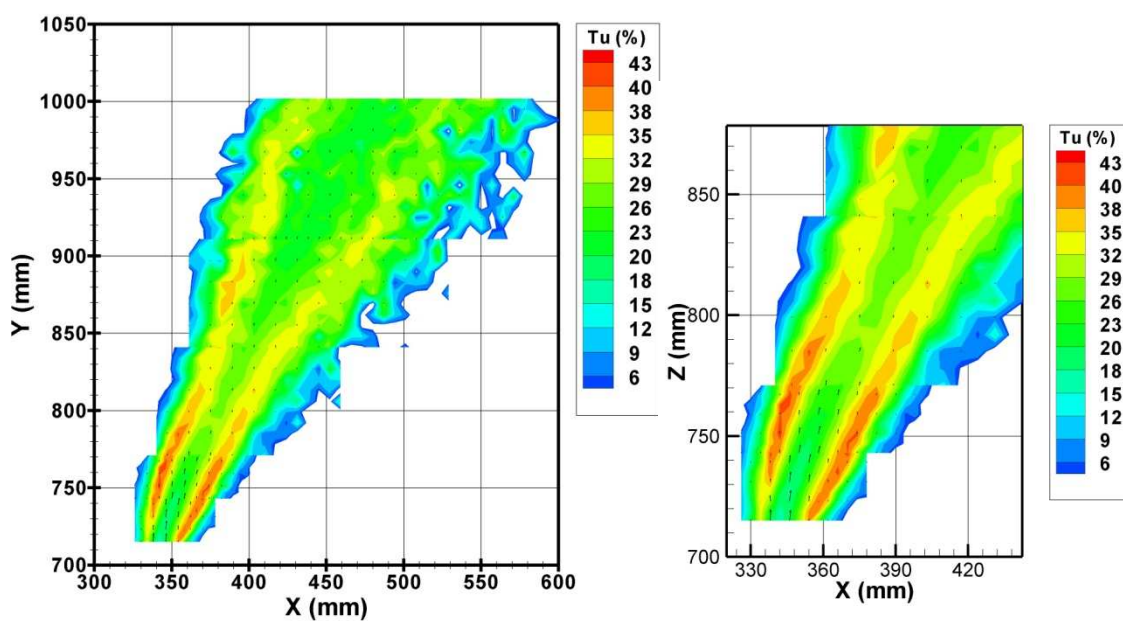
Obr. 8-7: Celková rychlost, pohled od řidiče, znázorněny všechny měřené roviny nad výdechem u středu přístrojové desky, vektory určují velikost a směr rychlosti, vpravo je znázorněn detail.



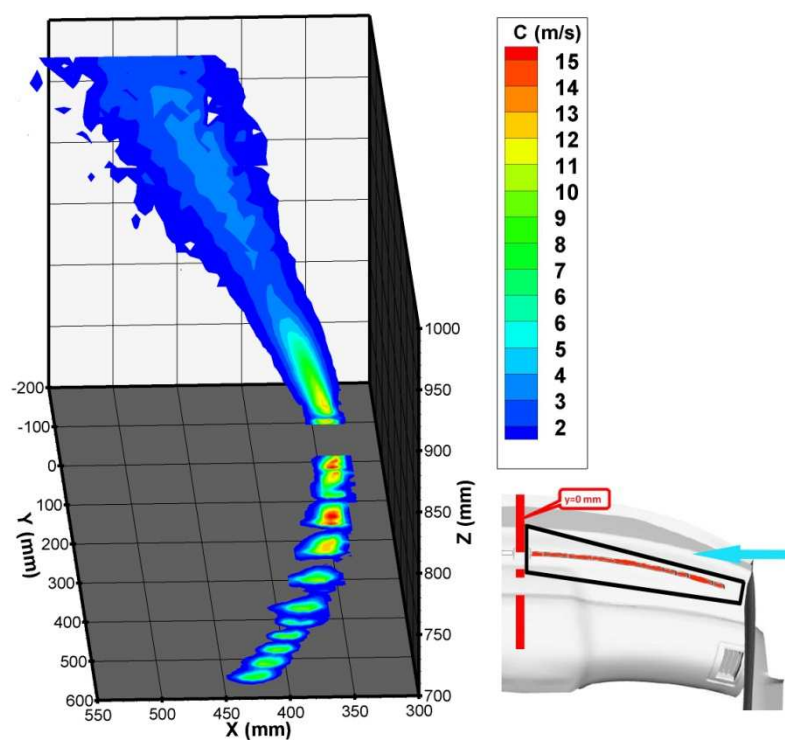
Obr. 8-8: Celková intenzita turbulence, pohled od řidiče, znázorněny všechny měřené roviny nad výdechem u středu přístrojové desky, vektory určují velikost a směr rychlosti, vpravo je znázorněn detail.



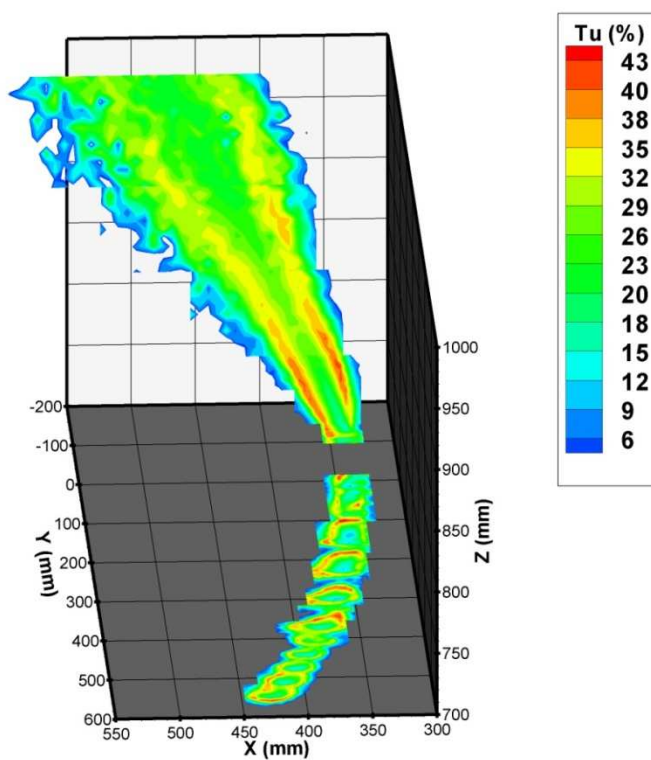
Obr. 8-7: Celková rychlost, pohled zleva, znázorněna vertikální rovina nad výdechem u středu přístrojové desky, vektory určují velikost a směr rychlosti, vpravo je znázorněn detail



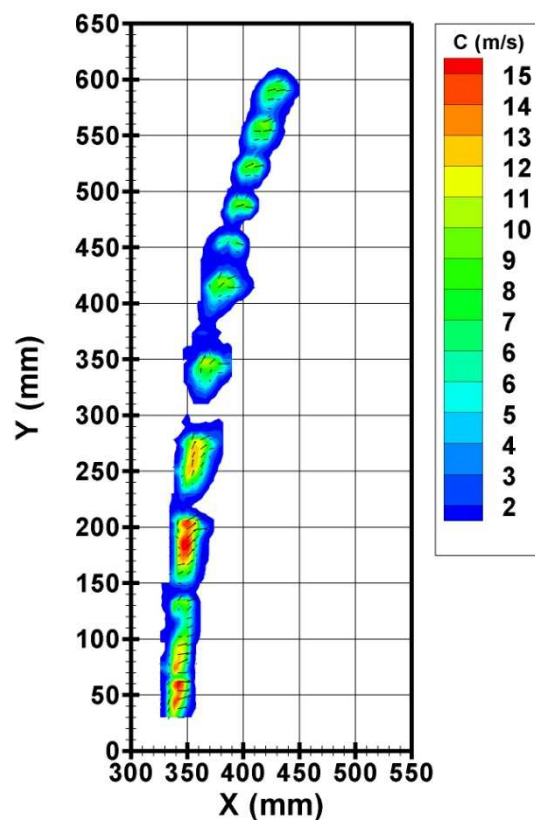
Obr. 8-8: Celková intenzita turbulence, pohled zleva, znázorněna vertikální rovina nad výdechem u středu přístrojové desky, vektory určují velikost a směr rychlosti, vpravo je znázorněn detail.



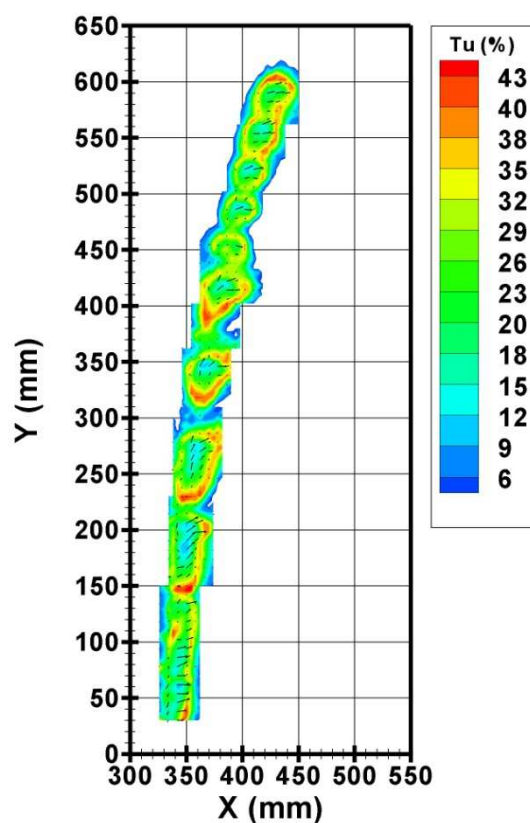
Obr. 8-9: Celková rychlost, pohled zprava, znázorněny všechny roviny měřené v $Z = 715$ mm a vertikální rovina nad výdechem u středu přístrojové desky.



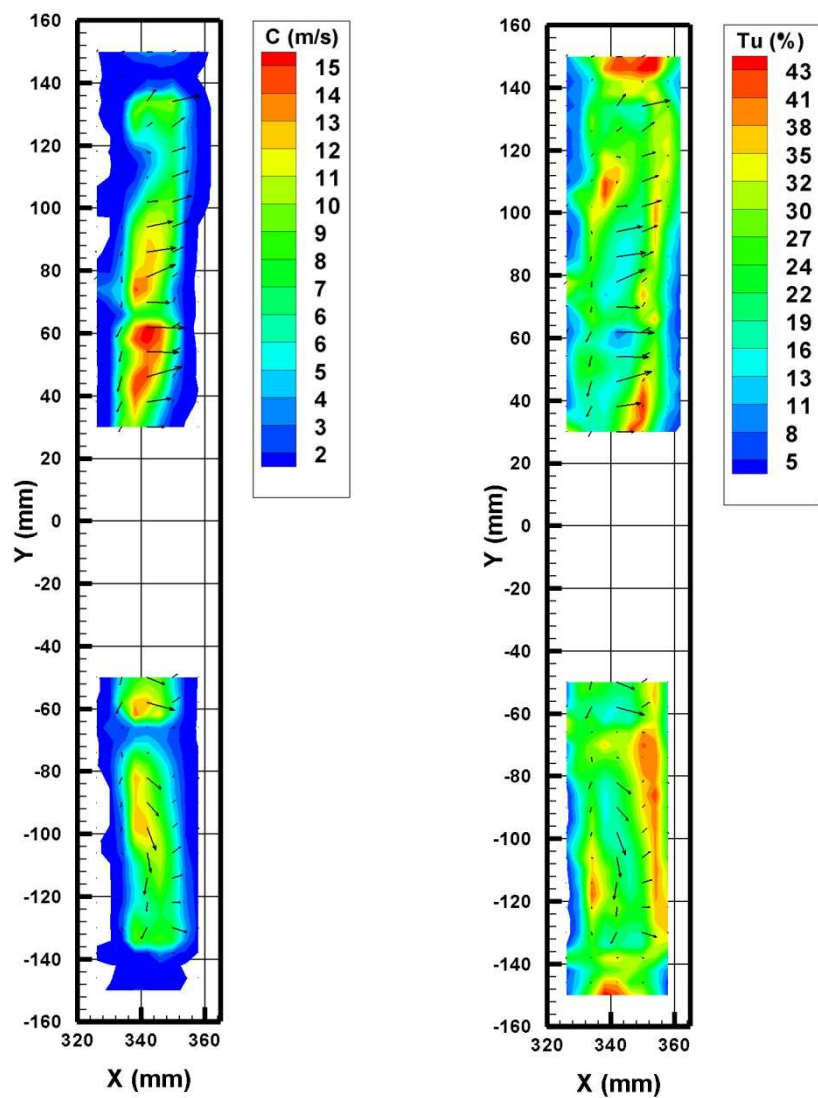
Obr. 8-10: Celková intenzita turbulence, pohled zprava, znázorněny všechny roviny měřené v $Z = 715$ mm a vertikální rovina nad výdechem u středu přístrojové desky.



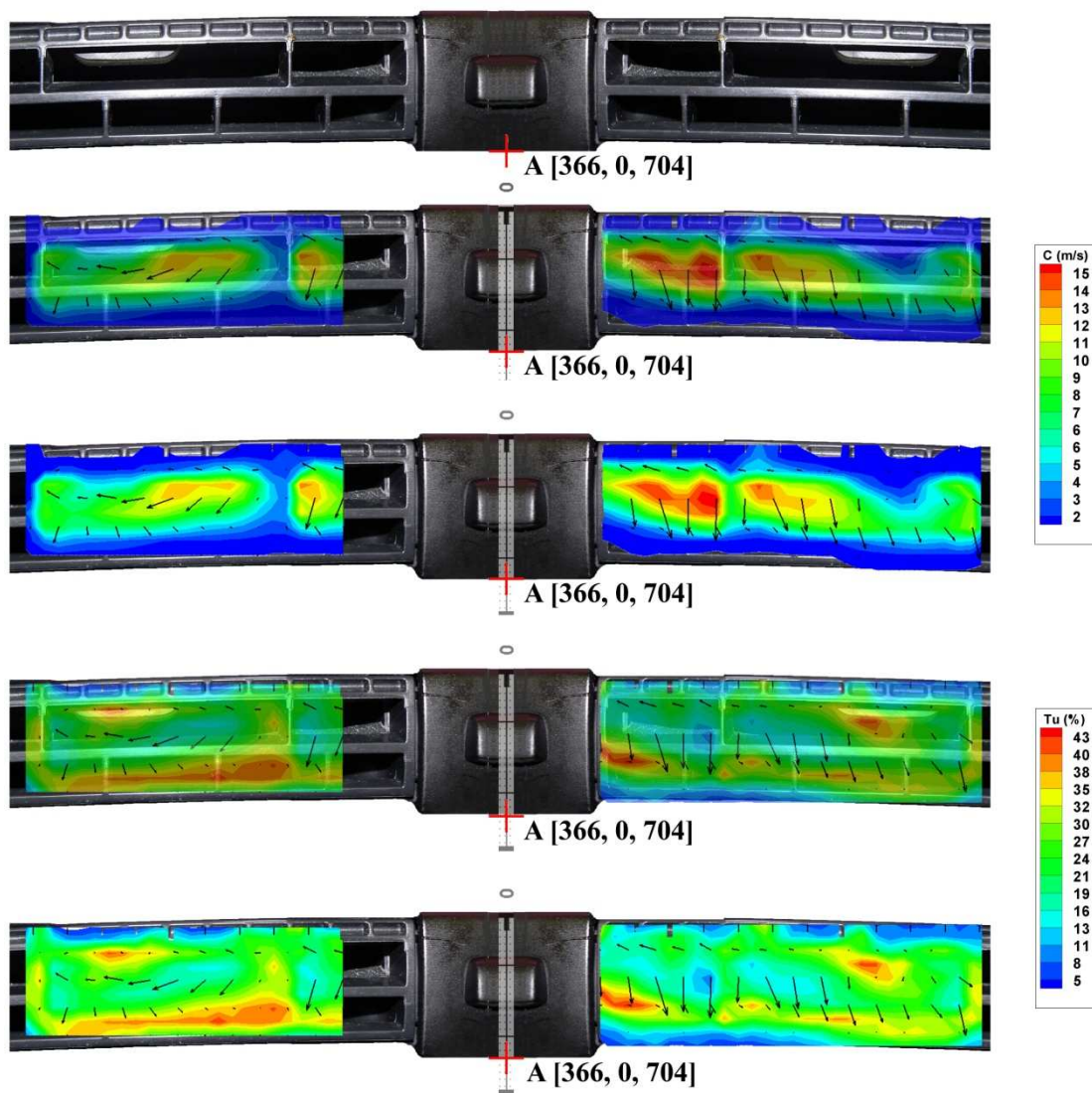
Obr. 8-11: Celková rychlost, pohled z vrchu, znázorněny všechny roviny nad pravou dorostovou mřížkou měřené v $Z = 715$ mm, vektory znázorňují velikost a směr proudění.



Obr. 8-11: Celková intenzita turbulence, pohled shora, znázorněny všechny roviny nad pravou dorostovou mřížkou měřené v $Z = 715$ mm, vektory znázorňují velikost a směr rychlost.

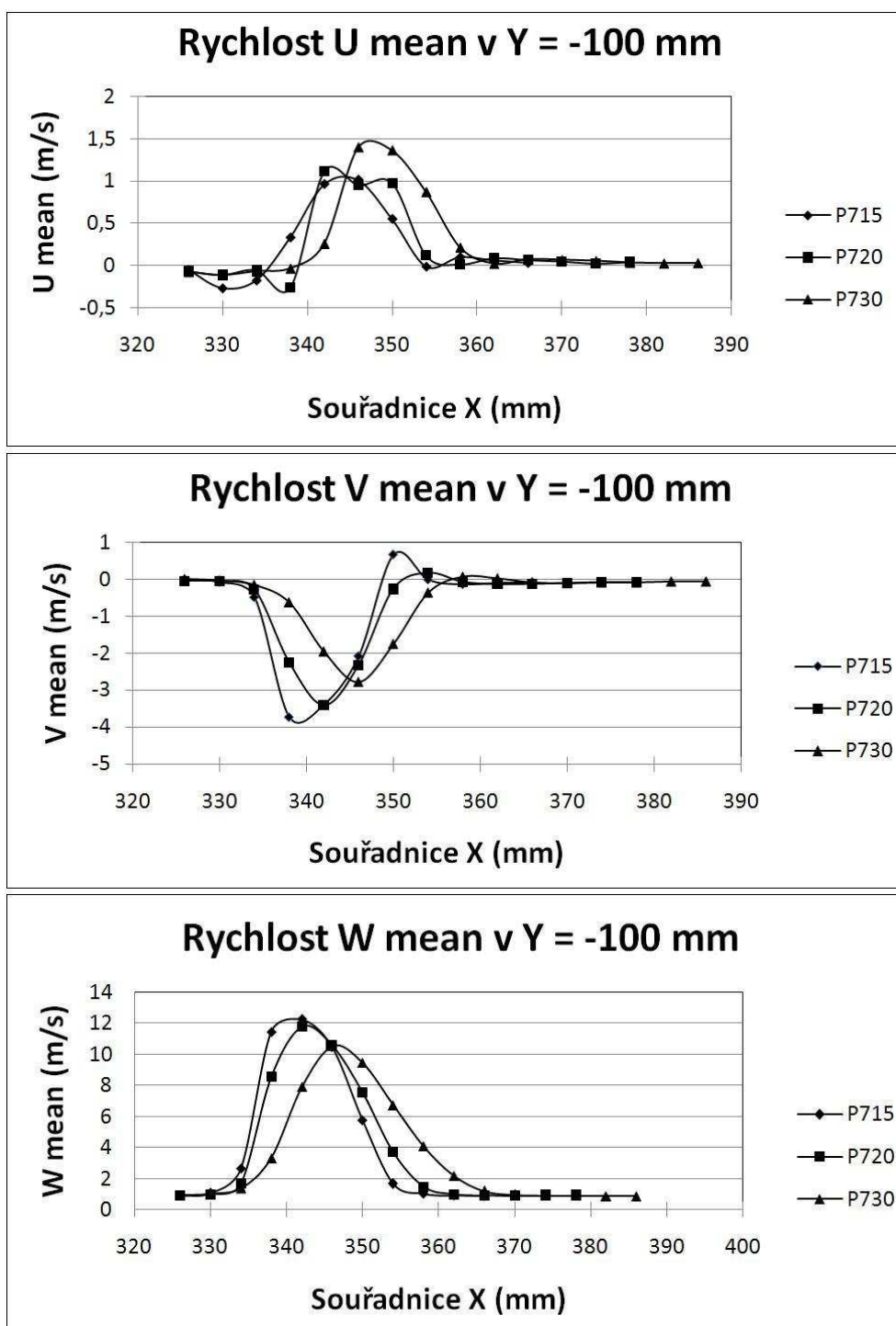


Obr. 8-12: Celková rychlost a intenzita turbulence, pohled shora, znázorněny roviny nad výdechy u středu přístrojové desky, měřené v $Z = 715$ mm, vektory znázorňují velikost a směr rychlosti.

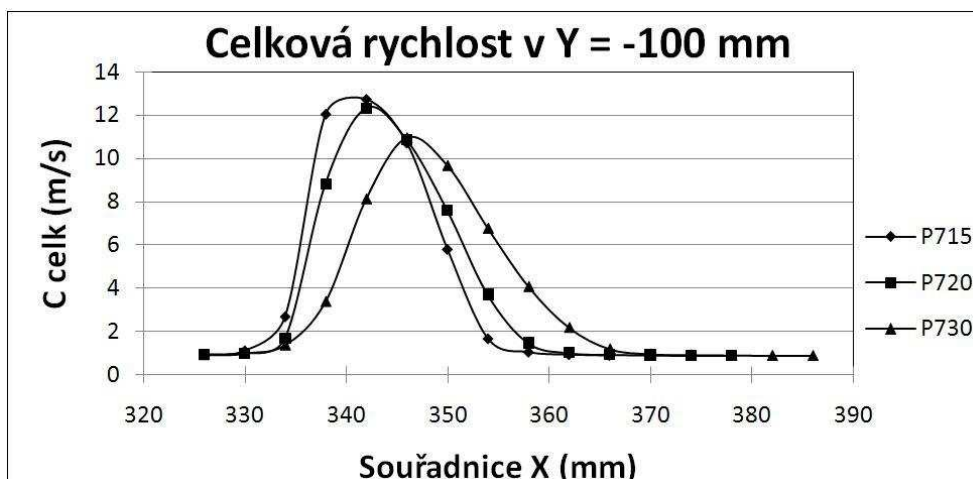


Obr. 8-13: Celková rychlost a intenzita turbulence, pohled shora, znázorněny roviny nad výdechy u středu přístrojové desky, měřené v $Z = 715 \text{ mm}$, vektory znázorňují velikost a směr rychlosti. Na 2. a 4. obrázku je změřené rovina zprůhledněna, tak aby byly vidět hrany výdechu.

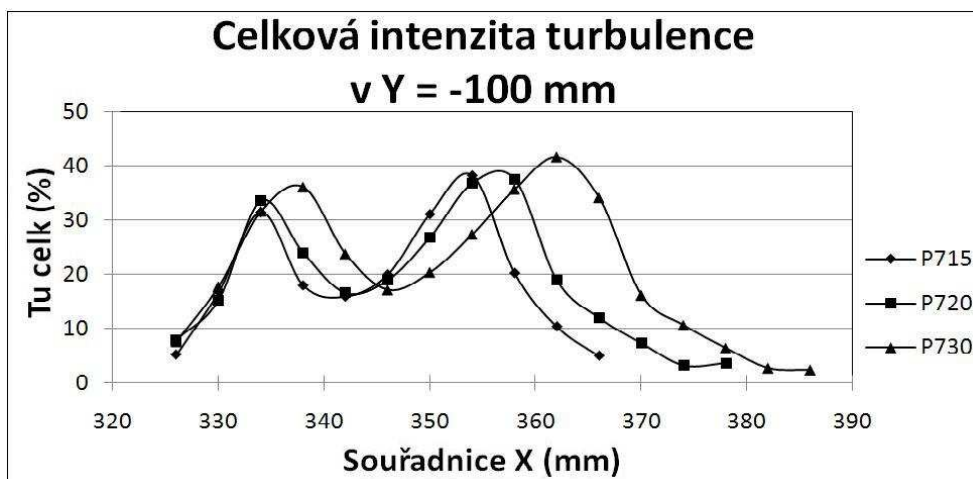
8.3 Grafy rychlostí a intenzity turbulence



Obr. 8-14: Složky rychlosti ve třech výškách nad výdechem u středu vozu ($Y = -100\text{mm}$)



Obr. 8-15: Celková rychlost ve třech výškách nad výdechem u středu vozu ($Y = -100\text{mm}$)



Obr. 8-15: Celková intenzita turbulence ve třech výškách nad výdechem u středu vozu ($Y = -100\text{mm}$)

8.4 Datové soubory

Datové soubory byly exportovány z programu Streamwave v textové podobě, následně byly převedeny do programu Microsoft Excel, kde byly uspořádány do podoby, kterou vyžadoval program Tecplot 9.0, v této formě uspořádání jsou data uvedena v textových souborech na přiloženém CD. Jedná se totiž o velké množství dat a jejich vytisknutí a uvedení v příloze nebylo možné. Každý datový soubor je uveden hlavičkou, která obsahuje důležité informace týkající se měření [11].

Původ dat: CTA anemometr Dantec StreamLine

Datum měření:

Čas měření: začátek měření dané roviny

Název roviny: označení měřených rovin bylo provedeno v kapitole 6

Rozsah v ose X: počáteční souřadnice, konečná souřadnice

Rozsah v ose Y: počáteční souřadnice, konečná souřadnice

Rozsah v ose Z: počáteční souřadnice, konečná souřadnice

Počet měřících bodů ve směrech X, Y, Z:

Teplota okolí (°C): na začátku měření

Relativní vlhkost prostředí (%): na začátku měření

Barometrický tlak (kPa): na začátku měření

Průtok (m^3/h): konstantní pro všechna měření o velikosti $340 \text{ m}^3/\text{s}$

Následuje hlavička, která označuje jednotlivé sloupce dat.

X (mm), Y (mm), Z (mm), U mean (m/s), U rms (m/s), V mean (m/s), V rms (m/s), W mean (m/s), W rms (m/s), C_{celk} (m/s), Tu_{celk} (%)

Ukázka datového souboru znázorňuje prvních 30 bodů z roviny RV1.

Původ dat: CTA

Datum měření: 14.4.2009

Čas měření: 15:42:25

Název roviny: RV1

Rozsah v ose X: 326, 378

Rozsah v ose Y: -100, 100

Rozsah v ose Z: 715, 743

Počet měřících bodů ve směrech X, Y, Z: 14, 1, 8

Teplota okolí (°C): 22,5°C

Relativní vlhkost prostředí (%): 30%

Barometrický tlak (kPa): 98,7kPa

Průtok (m^3/h): $340 \text{ m}^3/\text{s}$

X (mm), Y (mm), Z (mm), U mean (m/s), U rms (m/s), V mean (m/s), V rms (m/s), W mean (m/s), W rms (m/s), C_{celk} (m/s), Tu_{celk} (%)

378	-100	715	0,872	0,013	-0,053	0,008	0,025	-0,013	0,874	1,325
374	-100	715	0,857	0,018	-0,062	0,013	0,029	-0,019	0,860	1,962
370	-100	715	0,86	0,019	-0,062	0,013	0,022	-0,018	0,863	1,956
366	-100	715	0,896	0,067	-0,079	0,082	0,034	-0,053	0,900	7,595
362	-100	715	0,931	0,115	-0,113	0,142	0,074	-0,12	0,941	13,416
358	-100	715	1,069	0,383	-0,121	0,235	0,075	-0,21	1,078	26,554
354	-100	715	1,765	0,998	-0,042	0,444	-0,048	-0,447	1,766	38,581

350	-100	715	6,079	2,432	0,68	1,21	0,784	-1,585	6,167	29,443
346	-100	715	10,439	2,361	-2,031	1,808	1,07	-2,122	10,688	19,733
342	-100	715	11,81	2,312	-3,376	1,792	1,05	-1,91	12,328	16,361
338	-100	715	10,91	2,963	-3,527	1,903	0,274	-1,586	11,469	19,442
334	-100	715	2,448	1,273	-0,457	0,49	-0,141	-0,443	2,494	33,197
330	-100	715	1,129	0,263	-0,135	0,223	-0,238	-0,227	1,162	20,517
326	-100	715	0,946	0,092	-0,048	0,076	-0,109	-0,144	0,953	11,324
378	-100	719	0,881	0,02	-0,067	0,049	0,03	-0,027	0,884	3,880
374	-100	719	0,868	0,022	-0,057	0,026	0,031	-0,025	0,870	2,802
370	-100	719	0,88	0,035	-0,067	0,051	0,04	-0,042	0,883	4,886
366	-100	719	0,907	0,085	-0,096	0,115	0,056	-0,094	0,914	10,812
362	-100	719	1,031	0,267	-0,122	0,214	0,112	-0,211	1,044	22,227
358	-100	719	1,435	0,796	-0,089	0,366	0,033	-0,355	1,438	37,950
354	-100	719	3,54	1,969	0,182	0,829	0,085	-0,947	3,546	38,052
350	-100	719	7,517	2,428	-0,201	1,643	0,991	-2,048	7,585	27,222
346	-100	719	10,718	2,31	-2,392	1,775	0,948	-2,1	11,023	18,810
342	-100	719	11,818	2,482	-3,445	1,784	1,231	-1,782	12,371	16,512
338	-100	719	8,931	2,998	-2,406	1,653	-0,157	-1,443	9,251	23,187
334	-100	719	1,78	0,886	-0,272	0,421	-0,07	-0,393	1,802	33,857
330	-100	719	0,993	0,18	-0,101	0,201	-0,092	-0,163	1,002	18,157
326	-100	719	0,92	0,051	-0,046	0,104	-0,057	-0,097	0,923	9,451

•
•
•

8.5 Nejistoty měření

Pro vyhodnocení nejistot se vycházelo z předešlé práce [11], která čerpala z praktického průvodce firmy Dantec Dynamics [10], kde jsou uvedeny vztahy pro výpočet nejistot při měření CTA anemometrem Dantec StreamLine.

8.5.1 Vztahy pro výpočet nejistot

Celková nejistota měření u_{celk} je pomocí současných standardů definována jako kombinace dílčích nejistot $u(y_i)$ jednotlivých proměnných x_i . Výstupní veličina y_i je funkcí veličin vstupních x_i . Relativní standardní nejistotu výstupní veličiny vyjádříme rovnicí (8-1).

$$u(y_i) = \frac{1}{y_i} \cdot A_i \cdot \left(\frac{\Delta x_i}{k_i} \right) \quad (8-1)$$

kde: $A_i = \frac{\partial x_i}{\partial y_i}$ je faktor citlivosti

k_i je faktor pokrytí, je závislý na statistickém rozložení vstupní veličiny

Uvažujeme-li, že pro měření rychlosti proudění platí Gaussovo rozdělení, lze pak vyjádřit celkovou rozšířenou nejistotu měření následovně:

$$u_{\text{celk}} = 2 \cdot \sqrt{\sum u(y_i)^2} \quad (8-2)$$

Pomocí uvedených vztahů vypočítáme nejistotu určení jednoho vzorku, která slouží k porovnání přesnosti měření CTA metodou.

Použitím rovnic 8-1, 8-2 získáme vztahy pro určení nejistot vstupních veličin:

Vliv anemometru (posuv nuly, poměr signál – šum, frekvenční odezva)

V současnosti mají komerčně využívané anemometry velmi malý posuv nuly a dobrý poměr signál – šum, takže ve srovnání s ostatními faktory je nejistota způsobená těmito veličinami zanedbatelná. Nejistota spojená s frekvenční odezvou by byla významná v případě, že by frekvence v proudu byly vyšší než 50 % naší frekvenční odezvy 40 kHz, což se nepředpokládá, takže i tuto nejistotu zanedbáváme.

Kalibrace

Nejistota vzniklá kalibrací je významná, je způsobená nepřesností při měření tlaku, pro její výpočet se vychází ze standardní nejistoty mikromanometru, která je udávána výrobcem.

$$u_{\text{cal}} = \frac{1}{100} \cdot \text{STDV}(u_{\text{calibrator}}(\%)) \quad (8-3)$$

$$\text{STDV}(u_{\text{calibrator}}(\%)) = \pm a(\%) \pm b_{\text{cal}}(\text{m/s}) \quad (8-4)$$

Převod měřených dat (linearizace)

Nejistota je způsobená chybou při prokládání kalibračních bodů křivkou. Má náhodný charakter a normální rozdělení.

$$u_{\text{lin}} = \frac{1}{100} \cdot \text{STDV}(\Delta u_{\text{fit}}(\%)) \quad (8-5)$$

Kde $\text{STDV}(\Delta u_{\text{fit}}(\%))$ je standardní odchylka kalibračních bodů od proložení polynomem.

Rozlišení měřicí karty (A/D převodníku)

Nejistota má náhodný charakter a rovnoměrné rozdělení.

$$u_{\text{res}} = \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot \frac{1}{w} \cdot \frac{E_{A/D}}{2^n} \cdot \frac{\partial w}{\partial E}$$

kde: w je rychlost proudění
 $E_{A/D}$ je vstupní rozsah měřicí karty
 $\frac{\partial w}{\partial E}$ je faktor citlivosti z kalibrační křivky $w=f(E)$
 n je rozlišení měřicí karty (bity)

Nejistota polohy sondy

Tato nejistota vzniká rozdílnou polohou sondy během kalibrace a během experimentu. Jedná se o změnu sklonu sondy. Nejistota má náhodný charakter a rovnoměrné rozdělení.

$$u_{\text{pos}} = \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot (1 - \cos \theta) \quad (8-7)$$

kde: θ je úhel změny sklonu sondy

Změna teploty drátku

Změna teploty okolí má vliv na změnu teploty senzoru, není-li anemometrem prováděna teplotní korekce, vzniká nejistota náhodného charakteru s pravoúhlým rozdělením.

$$u_{\text{tep}} = \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot \frac{1}{w} \cdot \frac{\Delta T}{T_w - T_o} \cdot \sqrt{\left(\frac{A}{B} \cdot \frac{1}{\sqrt{w}} + 1 \right)} \quad (8-$$

8)

kde: w je rychlost proudění (m/s)
 ΔT je rozdíl mezi referenční teplotou a skutečnou teplotou během měření
 T_w je teplota drátku (K)
 T_o je referenční teplota okolí (K)
 A, B jsou koeficienty (-)

Vliv změny teploty na hustotu vzduchu

Nejistota má náhodný charakter a pravoúhlé rozdělení.

$$u_{\rho, T} = \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot \Delta \rho_T = \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot \frac{\Delta T}{273} \quad (8-9)$$

kde: $\Delta \rho_T$ je změna hustoty způsobena změnou teploty

Změna atmosférického tlaku

Tlakové diference mají vliv na změnu hustoty vzduchu a tím pádem na výpočet rychlosti. Nejistota má náhodný charakter a pravouhlé rozdělení.

$$u_{p,p} = \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot \left(\frac{P_0}{P_0 + \Delta P} \right) \quad (8-10)$$

kde: P_0 je referenční atmosférický tlak

ΔP je rozdíl mezi referenční teplotou a skutečnou teplotou během měření

Změna složení vzduchu, vliv vlhkosti

Složení vzduchu se během experimentu výrazně nemění, jedinou změnou může být změna vlhkosti, což způsobí lepší vedení tepla. Nejistota má náhodný charakter a pravouhlé rozdělení.

$$u_{vlh} = \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot \frac{1}{U} \cdot \frac{\partial w}{\partial P_{wv}} \cdot \Delta P_{wv} \quad (8-11)$$

$$\frac{\partial w}{\partial P_{wv}} \approx 0,1 \cdot U \text{ na } 1\text{kPa } \Delta P_{wv}$$

kde: ΔP_{wv} je změna parciálního tlaku vodních par

8.5.1 Výpočet nejistoty měření rychlosti 3D sondou

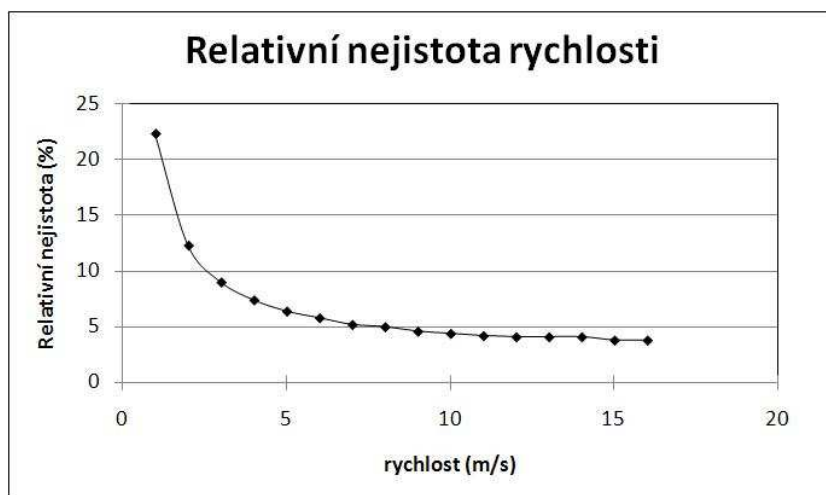
V následujících tabulkách je proveden výpočet relativních nejistot měření rychlosti. Tab. 8-1 znázorňuje podrobný postup výpočtu relativní nejistoty pro rychlost rovnu 10 m/s. V tabulce 8-2 jsou pak zachyceny hodnoty dílčích nejistot a celkové relativní nejistoty pro rychlosti v rozsahu 1 – 15 m/s, což je rozsah pokrývající hodnoty během experimentu. Na obrázku 8-1 je znázorněna grafická závislost relativní nejistoty na rychlosti.

Tab. 8-1: Výpočet nejistoty měření pro 10 m/s

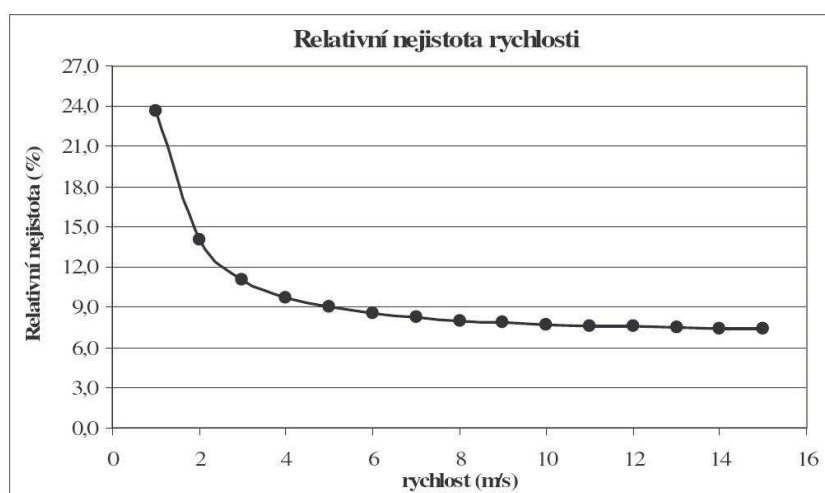
Původ nejistoty	Označení vstupní veličiny	Hodnota vstupní veličiny	Vztah pro výpočet dílčí nejistoty	Hodnota dílčí nejistoty
Kalibrace	$\Delta u_{\text{calibrator}}$	$\pm 1\% \pm 0,1 \text{ m/s}$	$u_{\text{cal}} = \frac{1}{100} \cdot \text{STDV}(u_{\text{calibrator}}(\%))$	0,02
Linearizace	Δu_{fit}	0,5%	$u_{\text{lin}} = \frac{1}{100} \cdot \text{STDV}(\Delta u_{\text{fit}}(\%))$	0,005
Rozlišení A/D převodníku	$E_{A/D}$ n $\frac{\partial w}{\partial E}$	10 V	$u_{\text{res}} = \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot \frac{1}{w} \cdot \frac{E_{A/D}}{2^n} \cdot \frac{\partial w}{\partial E}$	0,006
		12 bit		
		42,8 m/s/V		
Poloha sondy	θ	1°	$u_{\text{pos}} = \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot (1 - \cos \theta)$	$0,00009 \approx 0$
Změna teploty drátku	ΔT	2K	$u_{\text{tep}} = \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot \frac{1}{w} \cdot \frac{\Delta T}{T_w - T_o} \cdot \sqrt{\left(\frac{A}{B} \cdot \frac{1}{\sqrt{w}} + 1\right)}$	0,001
	$T_w - T_o$	180K		
	A	1,52		
	B	0,53		
Změna teploty okolí	ΔT	2K	$u_{p,T} = \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot \Delta p_T = \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot \frac{\Delta T}{273}$	0,004
Změna atm. tlaku	P_o	98500	$u_{p,P} = \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot \left(\frac{P_o}{P_o + \Delta P} \right)$	0,003
	ΔP	1kPa		
Změna vlhkosti	ΔP_{wv}	0,3kPa	$u_{\text{vlh}} = \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot \frac{1}{U} \cdot \frac{\partial w}{\partial P_{\text{wv}}} \cdot \Delta P_{\text{wv}}$	0,0015
Celková relativní rozšířená nejistota: $u_{\text{celk}} = 2 \cdot \sqrt{\sum u(y_i)^2} = 0,045 = 4,4\%$				

Tab. 8-2:*Výpočet nejistot měření rychlosti v rozsahu 1 m/s – 15 m/s*

Rychlost (m/s)	u_{cal} (%)	u_{lin} (%)	u_{res} (%)	u_{tep} (%)	$u_{p,T}$ (%)	$u_{p,P}$ (%)	u_{vlh} (%)	u_{celk} (%)
1	11	0,5	1,0	1,3	0,4	0,3	0,15	22,3
2	6	0,5	1,0	0,6	0,4	0,3	0,15	12,3
3	4,3	0,5	0,9	0,4	0,4	0,3	0,15	9,0
4	3,5	0,5	0,9	0,3	0,4	0,3	0,15	7,4
5	3	0,5	0,8	0,1	0,4	0,3	0,15	6,4
6	2,7	0,5	0,8	0,1	0,4	0,3	0,15	5,8
7	2,4	0,5	0,7	0,1	0,4	0,3	0,15	5,2
8	2,3	0,5	0,7	0,1	0,4	0,3	0,15	5,0
9	2,1	0,5	0,6	0,1	0,4	0,3	0,15	4,6
10	2,0	0,5	0,6	0,1	0,4	0,3	0,15	4,4
11	1,9	0,5	0,6	0,1	0,4	0,3	0,15	4,2
12	1,8	0,5	0,6	0,1	0,4	0,3	0,15	4,1
13	1,8	0,5	0,6	0,1	0,4	0,3	0,15	4,1
14	1,7	0,5	0,5	0,1	0,4	0,3	0,15	3,8
15	1,7	0,5	0,5	0,1	0,4	0,3	0,15	3,8



Obr. 8-1: Průběh relativní nejistota rychlosti



Obr. 8-2: Průběh relativní nejistoty rychlosti získaný v předchozí práci

8.5.2 Rozbor nejistot měření

Z výsledků je zřejmé, že nejvýraznější vliv na celkovou hodnotu relativní nejistoty má dílčí nejistota vycházející z kalibrace sondy, její vliv je výrazný především v rozsahu nízkých rychlostí, což je jev typický pro žárovou anemometrii. S rostoucí rychlostí její velikost rychle klesá. Eliminovat tuto dílčí nejistotu je možné použitím velmi přesného mikromanometru a korektně, ale hlavně rychle, provedenou kalibrací. Zbylé dílčí složky nejistoty jsou převážně závislé na změnách klimatických podmínek, cesta jak snížit jejich význam, vede přes rychlé provedení experimentu, kdy nedojde k výrazným klimatickým výkyvům.

Při porovnání relativních nejistot vypočtených v této práci s výsledky předešlé práce, je zřejmé, že použití 3D sondy vedlo k posunu křivky nejistoty směrem k nižším hodnotám, což je především způsobené odstraněním 3 % dílčí nejistoty vzniklé zanedbáním třetí složky rychlosti při měření. Další vliv na snížení nejistoty mělo zkrácení měření na přibližně poloviční dobu (metodika použitá v předchozí práci vyžadovala pro získání všech tří složek rychlosti měření ve dvou orientacích sondy), čímž byl snížen význam klimatických vlivů.

Výpočet nejistoty měření SY sondou nebyl proveden, ale ze znalosti metodiky měření a hledisek zmíněných při vyhodnocení nejistot 3D sondy a sondy použité v předchozí práci, lze snadno popsat hlavní faktory, které se na celkové nejistotě měření budou podílet. Hlavní roli bude hrát, jako u obou předešlých sond, vliv kalibrace. Měření touto sondou je vícepolohové, takže bude třeba brát v úvahu nejistotu způsobenou nepřesným umístěním sondy do požadovaných poloh. Metodika použitá v této práci vyžadovala 10 natočení v jednom bodě měření, tento požadavek zvýší celkový čas na desetinásobek doby měření 3D sondou, tím bude výrazně povýšen vliv nejistot závislých na změnách klimatických podmínek. Sonda je určena k měření 3D proudění, žádnou složku rychlosti tedy nezanedbává, takže tento typ nejistoty nebude uvažován.

9 Vyhodnocení výsledků

Získané výsledky poskytují vcelku přijatelný pohled na proudění z defrostové mřížky. Proudění se, ve všech měřených rovinách, ukázalo jako vysoce turbulentní, což je z hlediska účinnosti systému rozmrazování čelního skla pozitivní. Nejvyšší naměřené rychlosti cca 15 m/s se vyskytovaly na výdeších pravé vyústky.

Pravý výdech u středu vozu

Výsledky nad tímto výdechem poskytují výstižný obraz proudu. Proud je vysoce turbulentní a skloněný směrem k řidiči. Na horizontálních rovinách je zřetelně zachycen vývoj turbulence se zvyšující se vzdáleností od výdechu.

Porovnání výdechů u středu vozu na levé a pravé vyústce

Je patrné, že i když jsou levá a pravá mřížka geometricky totožné, jen zrcadlově obrácené, proudy vystupující z nich se vcelku výrazně liší. A to jak kvantitativně, tak kvalitativně, z čehož je zřejmé, že na výsledném charakteru proudu se podílí i přírodní potrubí. Vektory rychlosti navíc poukazují na odlišný směr proudů, proud vycházející z výdechu na pravé straně bude více sklopený. Obr. 8.13 zobrazuje vliv jednotlivých hran výdechu na vývoj turbulence.

Pravá vyústka

Měření pravé vyústky jsme získali cenné informace pro popis celého proudění nad defrostovou mřížkou. Proudění blíže středu jsou plochého průřezu a mají vyšší výtokovou rychlost, směrem dál od středu se proudění mění spíše na kruhové a velikost rychlosti má klesající tendenci. Vektory znázorňují směr jednotlivých proudů, které směřují do prostoru spolujezdce. Je také patrné, že na vývoj turbulence nemá, ani tak vliv vysoká výtoková rychlost, jako spíše tvar mřížky, vysoká intenzita turbulence se objevuje, jak u středu vozu, tak i na kraji mřížky.

Grafy složek rychlostí a intenzity turbulence

Grafy zachycují složky rychlostí v profilech lišících se ve výšce nad výdechem, je z nich zřejmé, že z výdechu vystupuje proud s dominantní složkou rychlosti ve směru osy z. Graf intenzity turbulence jasně znázorňuje její růst se zvyšující se výškou nad výdechem. Také je patrné, že intenzita turbulence v jádru proudu je výrazně nižší, než na jeho okrajích.

Porovnání výsledků měření 3D a SY sondou

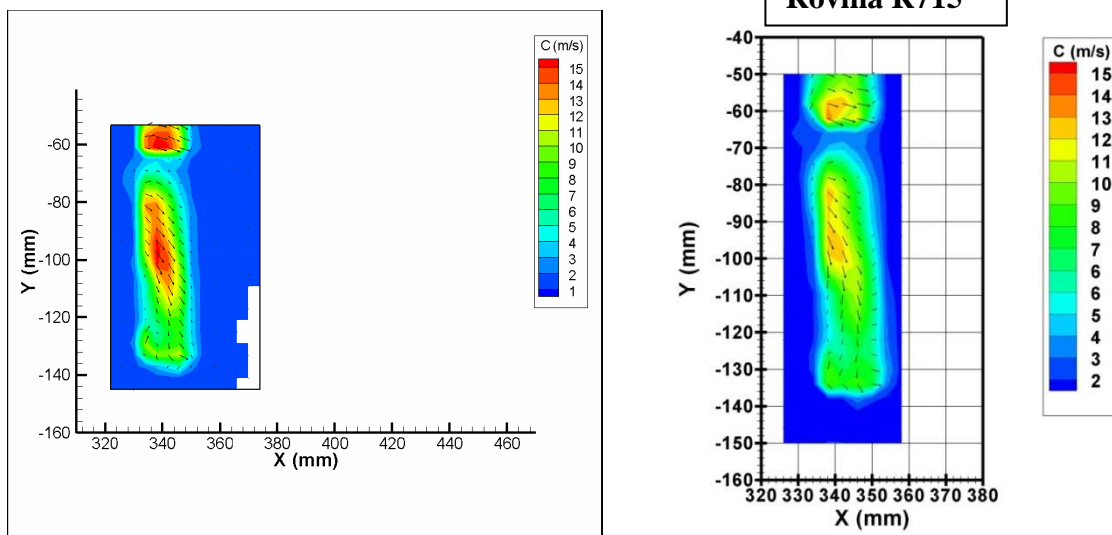
Výsledky na měřeném profilu jsou si, při použití jednotlivých metodik, blízké. Dominantní složka rychlosti se pohybuje v přibližně totožných mezích, zbylé dvě složky poskytnuté SY sondou jsou mírně rozkolísané, což bude způsobené komplikovanějším způsobem měření a vyhodnocení dat SY sondou, které poskytuje mnohem větší prostor pro zavedení chyby.

10 Zhodnocení použitých přístupů měření

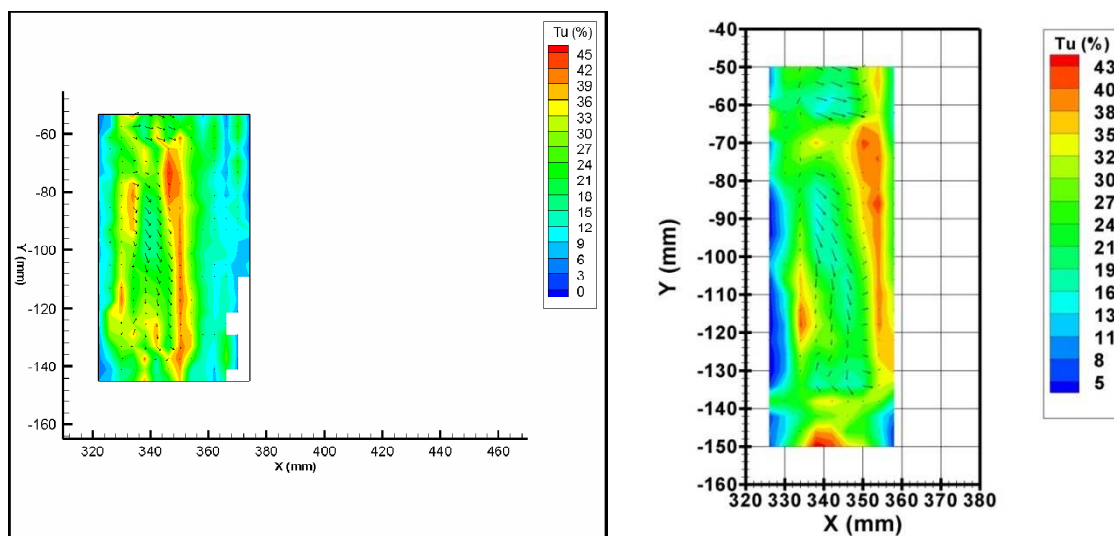
Měření proudění 3D sondou je jednoduché, rychlé a přesné. K získání požadovaných veličin ve zkoumaném bodě stačí provést jediné měření, což umožňuje provádět i velmi rozsáhlá měření. Požadované veličiny jsou následně automaticky vypočítány řídicím softwarem. Nevýhoda může být větší rozměr sondy. Použití SY sondy je mnohem komplikovanější, pro získání požadovaných veličin je nutné měřit ve zkoumaném bodě v několika natočeních. V této práci, byla zvolena metoda čítající deset natočení, což desetinásobně zvedne čas měření. Je nutné dále připočíst čas potřebný k manuálnímu natočení sondy do požadované polohy. Software následně poskytne jednu složku rychlosti, kterou je nutné pomocí složité soustavy rovnic přepočítat do požadovaných složek, odpovídajících laboratornímu souřadnému systému. Sonda je vhodná spíše pro menší rozsahy měření. Hlavní výhoda SY sondy je její cena, která je několikanásobně nižší, než cena 3D sondy. Dojde-li k poškození je i její následná oprava jednodušší a levnější.

11 Porovnání výsledků s předchozí prací

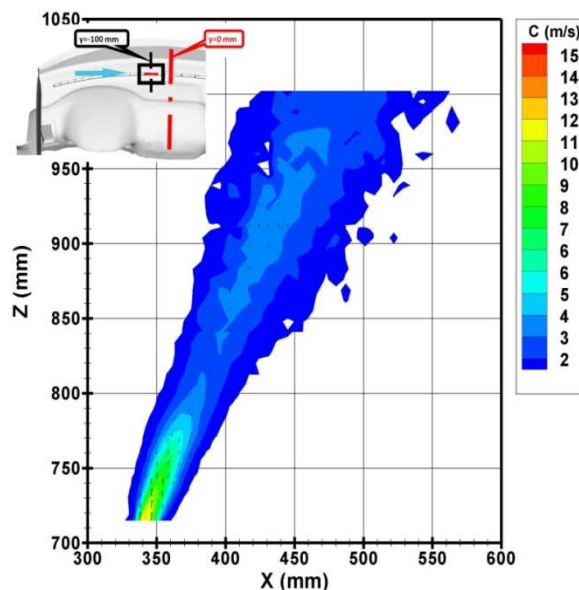
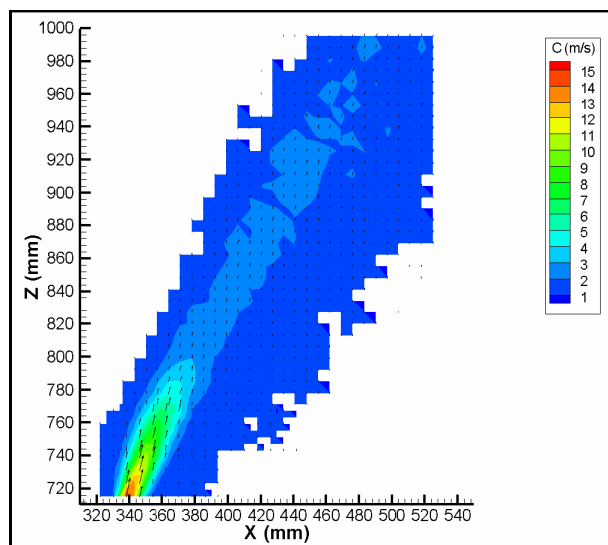
11.1 Grafické porovnání výsledků



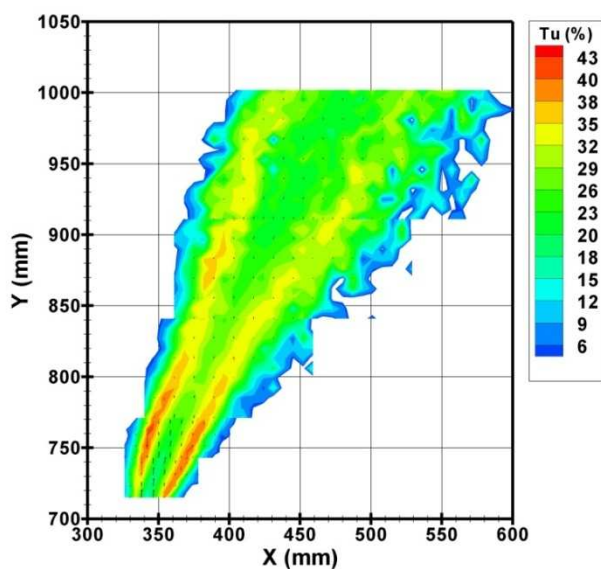
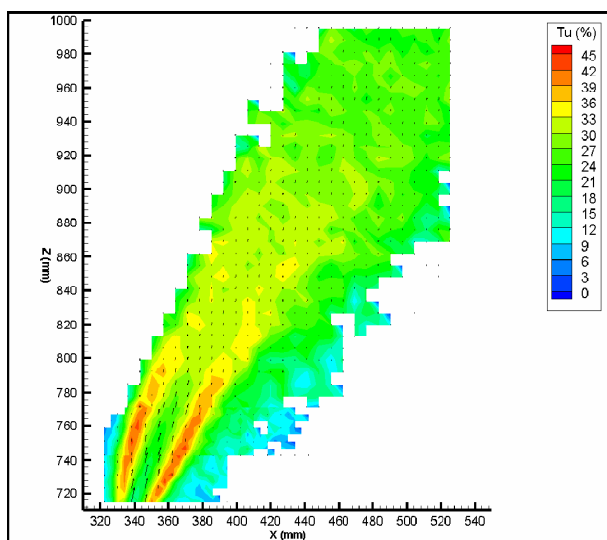
Obr. 10-1: Znáznorněna celková rychlost v rovinách nad výdechem u středu vozu ve výšce $Z = 715$ mm, vpravo znázorněna rovina získaná v této práci.



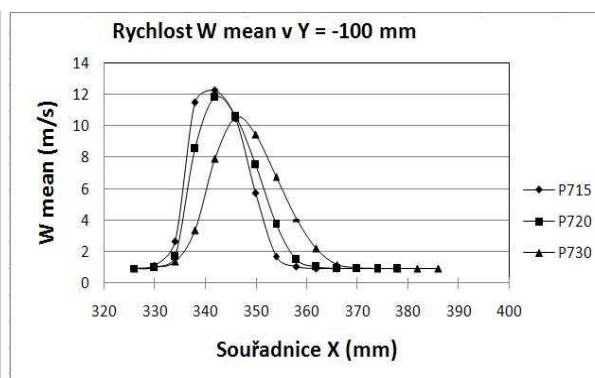
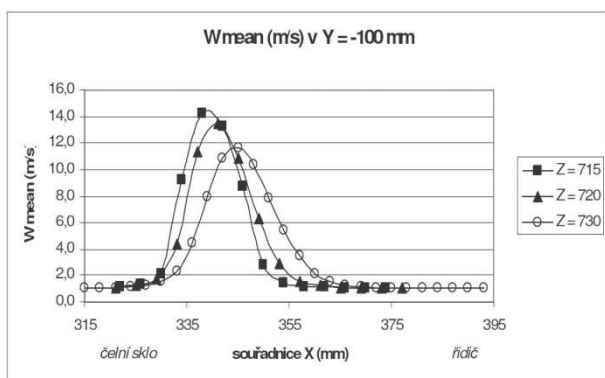
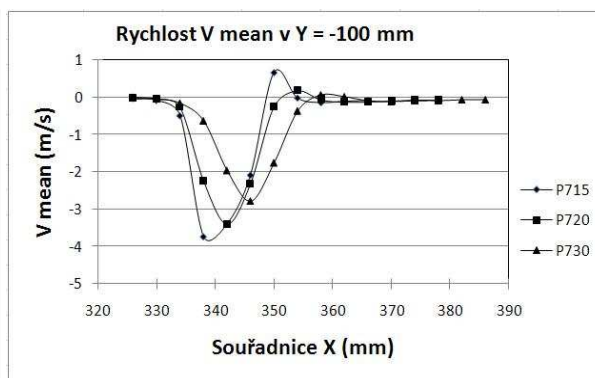
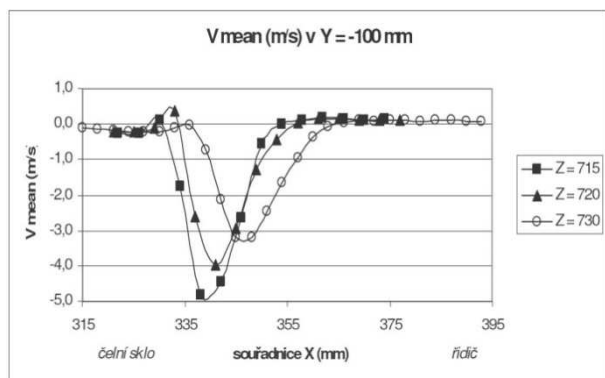
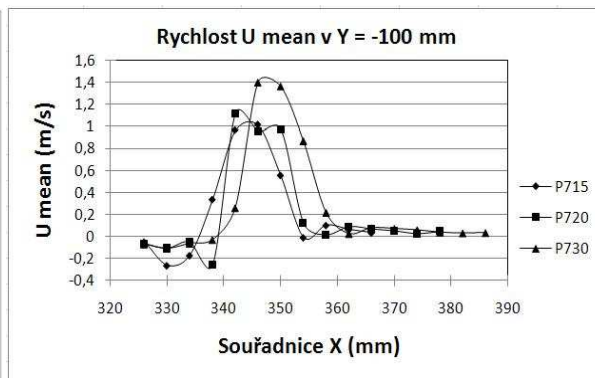
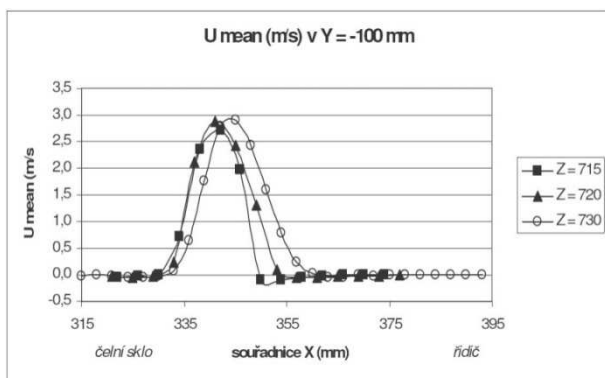
Obr. 10-2: Znáznorněna celková intenzita turbulence v rovinách nad výdechem u středu vozu ve výšce $Z = 715$ mm, vpravo znázorněna rovina získaná v této práci.



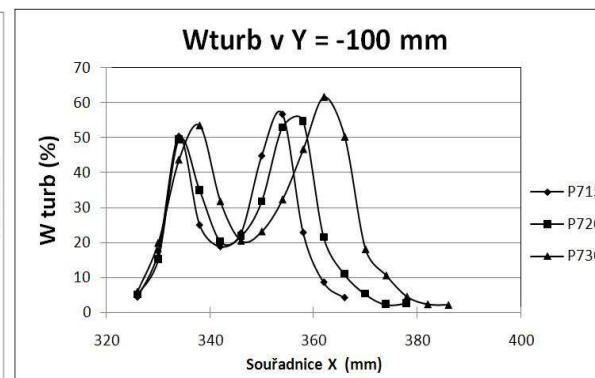
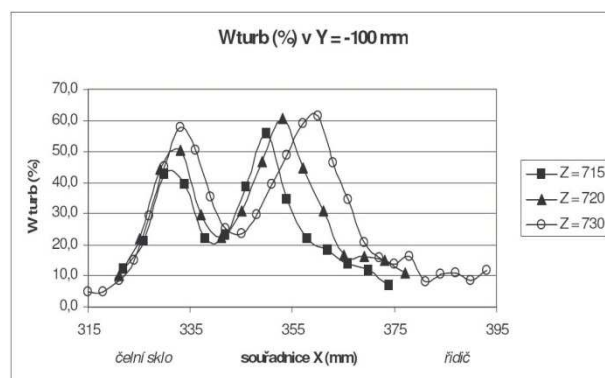
Obr. 10-3: Znáznorněna celková rychlost ve vertikální rovině ($Y = -100\text{mm}$) nad výdechem u středu přístrojové desky, vpravo znázorněna rovina získaná v této práci.



Obr. 10-3: Znáznorněna celková intenzita turbulence ve vertikální rovině ($Y = -100\text{mm}$) nad výdechem u středu přístrojové desky, vpravo znázorněna rovina získaná v této práci.



br. 10-4: Porovnání složek rychlostí v profilu v poloze Y = -100 mm



Obr. 10-5: Porovnání složky intenzity turbulence ve směru osy z v profilu v poloze Y = -100 mm

11.2 Vyhodnocení porovnání výsledků

K porovnání výsledků jednotlivých prací posloužily obrazy celkové rychlosti a celkové intenzity turbulence v rovinách $Z = 715 \text{ mm}$ a vertikální rovině se souřadnicí $Y = -100 \text{ mm}$. Z obrázků je patrné, že obě měření se z kvalitativního popisu proudu téměř shodují, tvar a směr proudu je přibližně totožný. Jádru proudu vystupuje z výdechu ve stejném místě. Maximální intenzita turbulence se vyskytuje na okraji proudu. Z kvantitativního hlediska se potvrdil předpoklad, že data získaná předchozí práci jsou mírně nadhodnocena, použitá metodika vždy jednu nedominantní složku zanedbala a tím pádem ostatní dvě navýšila, což je jednak zřejmé z obrazů, ale především ze znázorněných grafů, kde jsou zobrazeny profily složek rychlostí ve třech výškách a $Y = -100 \text{ mm}$. Polohy maximálních hodnot složek rychlostí se mírně liší, což je s největší pravděpodobností způsobeno nepřesností při zkoordinování traverzovacího systému se souřadným systémem vozu – ne úplně přesné najetí traverzu do bodu A. K porovnání intenzity turbulence posloužily grafy intenzity turbulence v dominantním směru proudu. Profil turbulence je v obou případech víceméně totožný, z hlediska číselného jsou rozdíly taktéž nevýrazné.

12 CFD

V předmětu počítačové modelování jsem vypracoval semestrální projekt, týkající se této problematiky. Vyhodnocoval jsem vývoj teploty čelního skla v čase a dobu kdy došlo k jeho celkovému odmlžení, výpočet byl zastaven v okamžiku, kdy teplota v bodě na obrázcích vyznačeném červeně dosáhla teploty rosného bodu při daných podmínkách.

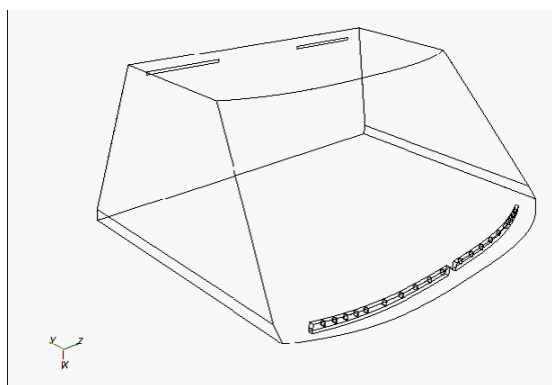
Vytvořil jsem si jednoduchou geometrii kabiny s defrostovou mřížkou, geometricky a rozměrově blízko té, která byla zkoumána v této práci.

Fyzikální model výpočtu byl zvolen takto: 3D, stacionární, vzduch, konstantní hustota, neustálené, turbulentní model K-epsilon, spojitý energetický model.

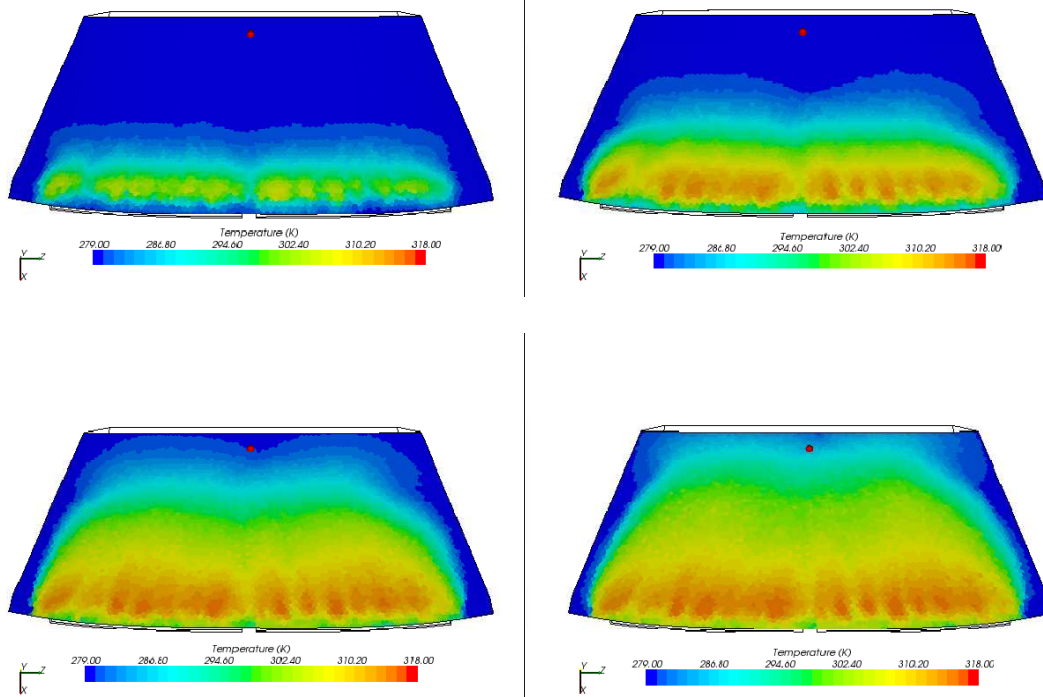
Vnitřní podmínky: $t = 8^\circ\text{C}$, $p_A = 101 \text{ hPa}$, $x = 12 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1} \text{ s.v.}$, teplota rosného bodu za těchto podmínek $t_r = 16,5^\circ\text{C}$.

Parametry na přívodu vzduchu: $w = 8 \text{ m/s}$, $T_u = 20\%$, $t_\infty = 45^\circ\text{C}$.

Pro čelní sklo byl zvolen součinitel přestupu tepla $\alpha = 4 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$



Obr. 11-1: Geometrie kabiny



Obr. 11-2: *Vývoj teploty na čelním skle*

Za uvedených podmínek trvalo přibližně 35 s, než stoupla teplota ve vyznačeném bodě na teplotu rosného bodu, čímž došlo k odmlžení podstatné části skla. Vývoj teploty je rovnoměrný po celé ploše skla, z toho hlediska se dá použitá mřížka hodnotit jako vyhovující. Jedná se ovšem jen o velmi zjednodušený model jak výpočtu, tak geometrie, a proto je nutné brát výsledky s rezervou.

13 Závěr

Cílem práce bylo provést měření proudění nad ofukovací mřížkou čelního skla osobního automobilu využitím žárové anemometrie a s použitím 3D a SY sond určených k měření třírozměrného proudění. Charakter volného proudu umožňoval bezproblémové využití 3D sondy, která poskytla poměrně rychle velké množství přesných, snadno zpracovatelných dat. Při dodržení zásad bezpečnosti při manipulaci s touto sondou, tak aby nedošlo k jejímu zbytečnému poškození, se otvírá široký prostor pro její využití v aplikacích, kde jsou požadovány rychlé a přesné výsledky. Rozbor nejistot měření potvrdil, že pro měření trojrozměrného proudění je postup využívající 3D sond nejvhodnější, použití zbylých zmíněných metod je samozřejmě možné, ale je nutné počítat s vyšším zatížením získaných dat nejistotami měření.

Měření SY sondou bylo provedeno v menším rozsahu s cílem porovnat jí naměřené hodnoty s hodnotami, která poskytla 3D sonda. Dalším záměrem bylo vyhodnotit vhodnost jejího použití při dalším výzkumu proudění v kabině osobního automobilu. Je třeba podotknout, že v této práci byla pozornost tomuto měření věnována jen okrajově, ale i přesto jsou získaná data vcelku přijatelná. Nevýhodou toho přístupu je vysoká časová náročnost, která je způsobena několikanásobným měřením v jednom bodě. Sonda by v budoucnu měla najít uplatnění hlavně v aplikacích s menším rozsahem měřících bodů, které z nějakého důvodu neumožní použití 3D sondy, např. bude-li k přístrojové desce přidáno čelní sklo a bude požadováno měření v jeho co největší blízkosti. Přejde-li na řadu tato etapa a k měření bude zvolena SY sonda, bude nutné dovybavit traverzovací systém otočným zařízením, které umožní automatické natáčení sondy do požadovaných poloh, což povede ke zrychlení, ale hlavně k zpřesnění měření.

14 Literatura

- 1) AWBI, Hazim. *Ventilation of buildings*. London : Spon press, 2003. 536 s. ISBN 0-415-27056-1.
- 2) BRUUN, H. *Hot-Wire Anemometry : Principles and Signal Analysis* . Oxford : Oxford University Press, 1995. 507 s. ISBN 0-19-856342-6.
- 3) BRUUN, H.; FITOURI, A.; KHAN, M.. *The use of a multiposition single yawed hot-wire probe for measurements in swirling flow*. ASME, *Third Int. Symp. on Thermal Anemometry, FED.*, Vol.167, Washington D.C., s. 57-65
- 4) Dantec Dynamics A/S. Dantecdynamics [online]. c2007 , 30.3.2007 [cit. 2007-03-29]. Dostupný z WWW: <<http://www.dantecdynamics.com>>.
- 5) Dantec Measurement Technology A/S. StreamLine/StreamWare: *Installation & User's guide*. 1st edition. [s.l.] : [s.n.], c2000. 3 sv. (96, 178, 118 s.).
- 6) DE GRANDE, G; KOOL,P. (1981). *An improved experimental method to determine complete Reynolds stress tensor with a single rotating slanting hot wire*. *J. Phys. E.: Sci Instr.*, 14, s.196-201.
- 7) HIRSCH, CH.; KOOL, P. (1977). *Measurements of the three-dimensional flow field behind an axial compressor stage*. ASME, *J. Eng. For Power*, 99
- 8) CHYSKÝ, Jaroslav; HEMZAL, Karel, a kol. *Větrání a klimatizace : Technický průvodce*. 3. přeprac. vyd. Praha: Bolit - B press Brno, 1993. 560 s. ISBN 80-901574-0-8.
- 9) JÍCHA, Miroslav. *Přenos tepla a látky*. Brno : Akademické nakladatelství CERM, 2001. 160 s. ISBN 80-214-2029-4.
- 10) JØRGENSEN, Finn. *How to measure turbulence with hot-wire anemometers : a practical guide*. 1st edition. [s.l.] : Dantec Dynamics A/S, 2001. 56 s. Dostupný z WWW: <<http://www.dantecdynamics.com>>.
- 11) LÍZAL, F. *Větrání kabiny vozidla – rychlostní pole v okolí vyústek přístrojové desky*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2006. 74 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Jan Jedelský, Ph.D.
- 12) PAVELEK, Milan; ŠTĚTINA, Josef. *Experimentální metody v technice prostředí*. Brno : Akademické nakladatelství CERM, 2007. 215 s. ISBN 978-80-214-3426-4
- 13) Škoda Auto. *Návod k obsluze : Škoda Octavia*. [s.l.] : [s.n.], 2005. 306 s. Dostupný z WWW: <http://ws.skodauto.com/download/cze/manual/newoctavia/navod_k_obsluze_octavia.pdf>.
- 14) Škoda Auto. *Zadávací dokumentace*. [online], [s.l.] : [s.n.], 2006. 8 s. Soubor ve formátu MS PowerPoint.

15 Seznam symbolů

<u>značka</u>	<u>název</u>	<u>jednotka</u>
A	kvadratický koeficient, bezrozměrný koef.	(-)
A _i	faktor citlivosti	(-)
B	kvadratický koeficient, bezrozměrný koef.	(-)
C	kvadratický koeficient	(-)
C	velikost celkové rychlosti	(m·s ⁻¹)
C _i	bezrozměrný koeficient	(-)
D _i	charakteristický koeficient SY sondy	(-)
D _{AB}	koeficient difuze látky A do látky B	(m ² ·s ⁻¹)
E	elektrické napětí	(V)
E _{AD}	vstupní rozsah měřicí karty	(V)
I	elektrický proud	(A)
L	charakteristický rozměr	(m)
N	počet vzorků	(-)
Nu	Nusseltovo bezrozměrné číslo	(-)
P	elektrický příkon	(W)
P	tlak	(Pa)
Pr	Prandtlovo bezrozměrné číslo	(-)
Q	tepelný tok	(W)
R	elektrický odpor	(Ω)
Re	Reynoldsovo bezrozměrné číslo	(-)
S	plocha	(m ²)
SC	charakteristický koeficient SY sondy	(-)
Sc	Schmidtovo bezrozměrné číslo	(-)
Sh	Sherwoodovo bezrozměrné číslo	(-)
SR	vzorkovací frekvence	(Hz)
STDV	standardní směrodatná odchylka	(%)
T	teplota	(K)
Tu	celková intenzita turbulence	(%)
U	složka rychlosti ve směru osy X	(m·s ⁻¹)
V	složka rychlosti ve směru osy Y	(m·s ⁻¹)
W	složka rychlosti ve směru osy Z	(m·s ⁻¹)
X	osa X, souřadnice X	(-)
Y	osa Y, souřadnice Y	(-)
Z	osa Z, souřadnice Z	(-)
a	úroveň nespolehlivosti	(%)
f	frekvence	(Hz)
c _p	měrná tepelná kapacita	(J·kg ⁻¹ ·K ⁻¹)
h	směrový koeficient	(-)
k	směrový koeficient	(-)
m	hmotnostní tok	(kg·s ⁻¹)

n	rozlišení měřicí karty	(bit)
n	bezrozměrný koeficient	(-)
t	čas	(s)
t	teplota	(°C)
u	relativní nejistota	(%)
w	obecná rychlost	(m·s ⁻¹)
x	nezávisle proměnná	(-)
y	výstupní veličina	(-)
z _a	proměnná závislá na úrovni spolehlivosti	(-)

řecké symboly

α	součinitel přestupu tepla	(W·m ⁻² ·K ⁻¹)
α	úhel	(1°)
β	součinitel přestupu látky	(kg·m ⁻² ·s ⁻¹)
β	úhel	(1°)
η	dynamická viskozita	(N·s·m ⁻²)
λ	součinitel tepelné vodivosti	(W·m ⁻¹ ·K ⁻¹)
ν	kinematická viskozita	(m ² ·s ⁻¹)
θ	úhel	(1°)
ρ	hustota	(kg·m ⁻³)

indexy

<i>cal</i>	kalibrace
<i>celk</i>	celková hodnota
<i>ef</i>	efektivní hodnota
<i>fit</i>	proložení polynomem
<i>lin</i>	linearizace
<i>mean</i>	časově střední hodnota
<i>n</i>	normála
<i>neg</i>	zanedbání
<i>pos</i>	pozice
<i>res</i>	rozlišení
<i>RMS</i>	root-mean-square value
<i>tep</i>	teplota
<i>Turb</i>	turbulence